

**České vysoké učení technické v Praze**  
**Fakulta elektrotechnická**  
**Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

# **Tenkvrstvé technologie**

## **Technologies for Thin Film Layer**

Bakalářská práce

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

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

**Petr Vaněk**  
**Praha, 2019**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaněk** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **465831**  
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:

**Tenkvrstvé technologie**

Název bakalářské práce anglicky:

**Technologies for Thin Film Layer**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište vlastnosti tenkých vrstev a možnosti jejich využití.
2. Seznamte se s technologiemi pro přípravu tenkých vrstev. Vybrané technologie podrobněji popište.
3. Experimentální cestou proveďte vliv podmínek depozičního procesu na vlastnosti nevodivých tenkých vrstev.
4. Porovnejte ekonomickou náročnost zvolených tenkovrstvých technologií.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- [2] Horynová, E: Nevodivé tenké vrstvy vytvořené naprašováním, diplomová práce, FEL ČVUT Praha 2017
- [3] Seshan, K.: Handbook of thin-film deposition processes and techniques : principles, methods, equipment and applications, Norwich 2002

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Prohlášení

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

V Praze dne \_\_\_\_\_

---

Petr Vaněk

# Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení a také za ochotu, čas a cenné rady poskytnuté v průběhu vytváření mé bakalářské práce. Mé poděkování patří i Ing. Miroslavu Vítкови, CSc. a doc. Ing. Júliu Bemšovi, Ph.D. za konzultace k ekonomické části práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval také mé rodině a přátelům za jejich podporu a trpělivost.

# Anotace

Bakalářská práce pojednává o tenkovrstvých technologiích. Nejprve se věnuje teoretickému základu vytváření tenkých vrstev a vlivům, které na tento výroby působí. Další kapitoly popisují jednotlivé technologie výroby, zejména napařování a napařování, a důležité mechanické a elektrické vlastnosti tenkých vrstev. V praktické části je vyhodnoceno měření na vytvořených vzorcích. Poslední kapitola pojednává o ekonomických nákladech technologií použitých k výrobě.

## Klíčová slova

Tenká vrstva, napařování, napařování, kapacita, kondenzátor, tloušťka

# Annotation

The bachelor's thesis deals with technologies for thin film layers. First of all the thesis focuses on the theoretical basics of creating thin film layer and influences on the process. Next chapters describe particular technologies, especially sputtering and evaporation, and important mechanic and electric characteristics of thin film layers. In the practical part the measurement of the samples made for the thesis is evaluated. The last chapter describes the economic costs of technologies used for making the samples.

## Keywords

Thin film layer, sputtering, evaporation, capacity, capacitor, thickness

# Obsah

Seznam tabulek .....	viii
Seznam obrázků .....	viii
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	x
Úvod .....	1
<b>1 Vrstvové technologie .....</b>	<b>2</b>
1.1 Tlustovrstvé technologie .....	2
1.2 Tenkovrstvé technologie .....	3
1.2.1 Využití tenkovrstvých technologií.....	3
<b>2 Tvorba tenkých vrstev .....</b>	<b>4</b>
2.1 Obecný princip vytváření tenkých vrstev .....	4
2.2 Vliv vakua na depozici tenké vrstvy.....	7
2.3 Způsoby získávání vakua .....	9
2.3.1 Rotační olejová vývěva .....	9
2.3.2 Pístová vývěva .....	10
2.3.3 Membránová vývěva .....	10
2.3.4 Difuzní vývěva.....	11
2.3.5 Iontová vývěva.....	11
2.4 Technologie vytváření tenkých vrstev.....	12
2.4.1 CVD .....	13
2.4.2 PECVD .....	14
2.4.3 PVD .....	14
2.4.4 Naprašování.....	14
2.4.5 Diodové stejnosměrné naprašování.....	15
2.4.6 Diodové vysokofrekvenční naprašování.....	15
2.4.7 Magnetronové naprašování .....	16
2.4.8 Reaktivní naprašování .....	16
2.4.9 Napařování .....	17
2.4.10 PLD.....	17
2.4.11 MBE.....	17
<b>3 Vlastnosti tenkých vrstev .....</b>	<b>19</b>
3.1 Dielektrikum .....	19
3.2 Mechanické vlastnosti tenkých vrstev .....	21
3.2.1 Tloušťka .....	21
3.2.2 Homogenita a vnitřní pnutí .....	21
3.2.3 Adheze .....	22
3.3 Elektrické vlastnosti tenkých vrstev .....	22
3.3.1 Permitivita .....	22
3.3.2 Kapacita .....	23
3.3.3 Ztrátový činitel $\tan \delta$ .....	24

<b>4</b>	<b>Praktická část</b> .....	<b>26</b>
4.1	Výrobní postup .....	26
4.1.1	Napařování elektrod .....	27
4.1.2	Naprašování dielektrika .....	28
4.2	Materiály použité pro výrobu .....	29
4.2.1	Substrát .....	29
4.2.2	Elektrody .....	29
4.2.3	Dielektrikum .....	30
4.2.4	Pracovní plyn .....	30
4.3	Měření vlastností .....	30
4.3.1	Měření tloušťky .....	30
4.3.2	Měření kapacity .....	32
4.4	Podmínky při výrobě kondenzátorů .....	33
4.5	Vyhodnocení měření .....	33
4.5.1	Měření kapacity .....	33
4.5.2	Měření tloušťky .....	38
<b>5</b>	<b>Ekonomické zhodnocení technologií</b> .....	<b>41</b>
5.1	Kalkulace nákladů .....	41
5.1.1	Kalkulace dělením .....	42
5.1.2	Kalkulace přírážková .....	42
5.2	Náklady na výrobu .....	43
5.2.1	Odpisy .....	43
5.2.2	Doba životnosti zařízení .....	43
5.2.3	Diskontní míra .....	43
5.2.4	Anuita .....	43
5.2.5	Pořizovací cena v dnešních penězích .....	44
5.2.6	Výpočet odepisované částky s anuitou .....	45
5.2.7	Náklady na mzdy, sociální a zdravotní pojištění .....	45
5.2.8	Náklady na materiál .....	46
5.2.9	Náklady na elektřinu .....	47
5.2.10	Náklady na ostatní položky .....	48
5.2.11	Celkové náklady .....	48
	<b>Závěr</b> .....	<b>49</b>
	<b>Literatura</b> .....	<b>51</b>
	<b>Seznam příloh</b> .....	<b>56</b>

# Seznam tabulek

2.1	Počet kroků potřebných ke zhotovení daných technologií [1].....	7
2.2	Hodnoty intervalů tlaků $p$ pro jednotlivé stupně dokonalosti vakua [11] .....	8
4.1	Podmínky při výrobě jednotlivých vzorků .....	33
4.2	Naměřené hodnoty kapacit $C$ kondenzátorů pro 3 výkony a 3 časy depozice.....	34
4.3	Změna kapacity $\Delta C$ kondenzátorů se vzrůstajícím časem depozice.....	35
4.4	Změna kapacity $\Delta C$ kondenzátorů se vzrůstajícím výkonem generátoru .....	36
4.5	Naměřené a vypočtené tloušťky $d$ dielektrické vrstvy .....	39
4.6	Aritmetický průměr tlouštěk dielektrické vrstvy na jednotlivých vzorcích .....	40
5.1	Průměrné hodnoty míry inflace z let 1989 až 2018 [41,42] .....	44
5.2	Přepočtené hodnoty na aktuální ceny pro komponenty naprašovacího zařízení .....	45
5.3	Přepočtené hodnoty na aktuální ceny pro komponenty napařovacího zařízení .....	45
5.4	Jednotlivé úkony při tvorbě tenkých vrstev a jejich časová náročnost .....	46
5.5	Spotřeba elektrické energie všech komponentů pro naprašování .....	47
5.6	Spotřeba elektrické energie všech komponentů pro napařování .....	47
5.7	Porovnání nákladů na výrobu tenkých vrstev napařováním a naprašováním .....	48

# Seznam obrázků

2.1	Princip spojení dvou částic sintrováním [7].....	5
2.2	Princip koalescence [8].....	5
2.3	Průběh depozice tenké vrstvy Ag na substrátu z $\text{MoS}_2$ [7] .....	6
2.4	Vliv teploty na vybrané parametry tenké vrstvy [9].....	6
2.5	Závislosti teploty tání materiálu na okolním tlaku [20] .....	9
2.6	Schéma jednodílné rotační olejové vývěvy [13] .....	10
2.7	Schéma pístové vývěvy [13] .....	10
2.8	Schéma difuzní vývěvy [17] (upraveno) .....	11
2.9	Schéma iontové vývěvy [12] .....	12
2.10	Základní rozdělení technologií pro vytváření tenkých vrstev [3] (upraveno) .....	12
2.11	Princip chemické depozice [6].....	13
2.12	Schéma sestavy pro chemickou depozici [3].....	13
2.13	Princip fyzikální depozice [6].....	14
2.14	Princip naprašování [19].....	15
2.15	Příklady konstrukcí válcového magnetronu (vlevo) a rovinného magnetronu (vpravo) s červeně znázorněným $E \times B$ driftem [23] (upraveno) .....	16
2.16	Spirálka pro napařování odporovým ohřevem [3] (upraveno) .....	17



3.1	Polární dielektrikum před vložením do elektrického pole (vlevo) a po vložení do elektrického pole o intenzitě E (vpravo) [35].....	20
3.2	Nepolární dielektrikum před vložením do elektrického pole (vlevo) a po vložení do elektrického pole o intenzitě E (vpravo) [35].....	20
3.3	Vzájemné působení vnitřního a vnějšího elektrického pole v dielektriku [25] .....	20
3.4	Vznik vnitřního pnutí na rozhraní substrát-vrstva při ochlazení [27] (upraveno) .....	22
3.5	Náhradní schéma a fázorový diagram pro sériové řazení součástek [36] .....	25
3.6	Náhradní schéma a fázorový diagram pro paralelní řazení součástek [36] .....	25
4.1	Schéma vzorku s kondenzátory .....	26
4.2	Schéma a popis zařízení firmy Edwards pro napařování [27] .....	27
4.3	Maska pro napařování .....	28
4.4	Schéma a popis zařízení firmy Balzers Pfeiffer využité pro napařování [27] .....	28
4.5	Maska pro napařování .....	29
4.6	Schéma měřícího přístroje Talystep [3] .....	30
4.7	Naměřený profil tenké vrstvy .....	31
4.8	Vyrovnaný profil tenké vrstvy .....	31
4.9	Oříznutý profil tenké vrstvy .....	31
4.10	Vyfiltrovaný profil tenké vrstvy .....	32
4.11	Měření tloušťky tenké vrstvy .....	32
4.12	Graf závislosti průměrné kapacity C jedné destičky při konstantních výkonech generátoru na čase depozice .....	35
4.13	Graf závislosti průměrné kapacity C jedné destičky při konstantních časech depozice na výkonu generátoru .....	36
4.14	Graf závislosti kapacity C jednotlivých kondenzátorů na poloze na destičce. Proloženo polynomy 2. a 4. stupně .....	37
4.15	Graf závislosti průměrné tloušťky $\bar{d}$ na čase pro výkony 80 W, 100 W a 120 W .....	40

# Seznam použitých zkratek a symbolů

<i>A</i>		anuita
Ag		stříbro
<i>B</i>	[T]	magnetická indukce
<i>C</i>		označení kondenzátoru
<i>C</i>	[F]	kapacita kondenzátoru
CMOS		complementary metal-oxide-semiconductor, technologie vytváření logických integrovaných obvodů
CVD		chemická depozice
<i>D</i>	[m]	průměr tělesa
<i>d</i>	[m]	tloušťka dielektrika, vzdálenost elektrod kondenzátoru
<i>E</i>	[V·m <sup>-1</sup> ]	intenzita elektrického pole
<i>E<sub>0</sub></i>	[V·m <sup>-1</sup> ]	intenzita vnějšího elektrického pole
<i>E<sub>p</sub></i>	[V·m <sup>-1</sup> ]	intenzita vnitřního elektrického pole
<i>f</i>	[Hz]	frekvence
ECL		elektroluminiscence
H-CMOS		high-speed CMOS
HMOS		high-performance Metal-Oxide-Semiconductor, technologie vytváření číslicových integrovaných obvodů
<i>I</i>	[A]	elektrický proud
<i>I<sub>C</sub></i>	[A]	elektrický proud kondenzátorem
<i>I<sub>R</sub></i>	[A]	elektrický proud rezistorem
<i>i<sub>x</sub></i>	[%]	inflace v daném roce
<i>J</i>	[CZK]	náklady na jeden výrobek
<i>k</i>	[J·K <sup>-1</sup> ]	Boltzmannova konstanta
<i>K<sub>a</sub></i>	[CZK]	cena přepočítaná k 01.01.2019
<i>K<sub>t</sub></i>	[CZK]	pořizovací cena
<i>L</i>	[m]	délka
<i>l</i>	[m]	střední volná dráha částice
<i>m</i>	[mm]	rozměr kondenzátoru
MBE		epitaxe z molekulárních svazků
MoS <sub>2</sub>		disulfid molybdenu
<i>N</i>	[-]	počet částic v prostoru
<i>n</i>	[mm]	rozměr kondenzátoru
NMOS		N-type metal-oxide-semiconductor, technologie vytváření logických integrovaných obvodů
<i>O</i>	[CZK]	částka odepisovaná za jeden rok
<i>p</i>	[Pa]	tlak plynu
p.a.		per annum, za jeden rok
PECVD		plasmaticky aktivovaná chemická depozice
PLD		pulzní laserová depozice
PVD		fyzikální depozice
<i>Q</i>	[C]	elektrický náboj
<i>R</i>		označení rezistoru
<i>R</i>	[Ω]	odpor rezistoru

$r$	[-]	diskontní sazba
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$s$	[-]	počet srážek
s.r.o.		společnost s ručením omezeným
$T$	[K]	termodynamická teplota
$t$	[s]	čas
$T_c$	[K]	teplota částic dopadajících na substrát
$t_p$	[-]	rok pořízení daného zařízení
$T_s$	[K]	teplota substrátu
$T_v$	[K]	teplota emitovaných částic
$T_{\check{z}}$	[let]	doba životnosti
$TC$	[CZK]	celkové náklady
$tg$		tangens
$tg \delta$	[-]	ztrátový činitel
TiN		nitrid titanu
TTL		tranzistorově-tranzistorová logika
$U$	[V]	napětí
$U_c$	[V]	napětí na kondenzátoru
$U_R$	[V]	napětí na rezistoru
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost
$x$	[m]	vzdálenost
$Z$	[-]	celkový počet výrobků
$\alpha$	[-]	akomodační koeficient
$\beta$	[K <sup>-1</sup> ]	koeficient teplotní roztažnosti
$\delta$	[rad]	ztrátový úhel kondenzátoru
$\Delta L$	[m]	změna délky
$\Delta T$	[K]	změna teploty
$\varepsilon$	[F·m <sup>-1</sup> ]	permitivita
$\varepsilon_0$	[F·m <sup>-1</sup> ]	permitivita vakua
$\varepsilon_r$	[-]	relativní permitivita
$\varphi$	[rad]	úhel mezi fázorem napětí a proudu

# Úvod

Tenkovrstvé technologie jsou moderní technologie zabývající se nanášením materiálu o tloušťce od jednoho nanometru až po jednotky mikrometrů na podložku. [1] Pro představu, lidský vlas má tloušťku přibližně 50 mikrometrů. Tenké vrstvy jsou tedy mnohonásobně tenčí než lidský vlas, z čehož plynou jejich odlišné vlastnosti. Je zřejmé, že v materiálu o tloušťce maximálně jednotek mikrometrů nemohou platit stejné fyzikální konstanty jako v materiálu o běžném objemu. [2] Takto tenký materiál má zcela jedinečné vlastnosti, které mají nedocenitelný význam nejen pro elektrotechniku, ale i pro další odvětví průmyslu a lidskou společnost obecně. Spolu s těmito specifickými vlastnostmi se zde objevují také specifické problémy, které při vytváření takto tenkých vrstev vznikají. Na vrstvu působí velké množství vnějších i vnitřních vlivů, které mají negativní dopad na průběh jejího vytváření a které je potřeba měřit a kontrolovat.

Tenké vrstvy jsou dnes používány v obrovském měřítku, každý z nás se s nimi setkává denně. Najdeme je na kontaktech polovodičů, Schottkyho bariér<sup>1</sup>, na fotovoltaických panelech a také na povrchu vrtáků nebo v podobě reflexní vrstvy na zrcadlech. Je pravděpodobné, že do budoucna se použití těchto technologií ještě rozšíří na nové oblasti průmyslu i každodenního života lidí, z čehož vyplyne tlak jak na neustálé zvyšování kvality tenkých vrstev, tak na snižování ekonomických nákladů na výrobu a hledání nových možností použití této technologie. Cílem této práce je teoretické zhodnocení používaných technologií a experimentální prověření vlivu určitých jevů na výrobu tenkých vrstev. V první teoretické části se zaměřím na základní popis tenkovrstvých technologií a rozdíly mezi tenkou a tlustou vrstvou. V druhé teoretické části popíši obecný průběh vzniku tenké vrstvy a jednotlivé způsoby jejich vytváření. Ve třetí části rozeberu důležité mechanické a elektrické vlastnosti tenkých vrstev a jejich využití v průmyslu. Ve čtvrté praktické části poté při definovaných podmínkách zhotovím vzorky, které podrobím měření kapacity a tloušťky. Na základě tohoto měření vyhodnotím vliv podmínek výrobního procesu a jejich změn na vlastnosti tenkých vrstev. V poslední části bude následně porovnána ekonomická náročnost technologií, které byly využity k výrobě zkoumaných vzorků.

---

<sup>1</sup> potenciálová bariéra vznikající při styku polovodiče s kovem [16]

# Kapitola 1

## Vrstvové technologie

Vrstvové technologie lze obecně rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou tenkovrstvé technologie a druhou tlustovrstvé technologie. Tato práce se zaměřuje zejména na ty tenkovrstvé, avšak aby bylo možno je detailněji popsat a správně pochopit, je třeba definovat, co vlastně obě skupiny znamenají a popsat základní rozdíly mezi nimi. Tenkovrstvé i tlustovrstvé technologie mají velmi široké využití v různých oblastech průmyslu. Vytváří se z vodivých, polovodivých i nevodivých materiálů. Také se ale v mnoha aspektech liší. Jak už názvy napovídají, největší rozdíl spočívá v jejich tloušťce. Z této skutečnosti plynou další rozdíly, které obě technologie předurčují k použití pouze v některých aplikacích. Obě skupiny podrobněji popíši v následujících odstavcích.

### 1.1 Tlustovrstvé technologie

O vrstvě je možné hovořit jako o tlusté vrstvě právě tehdy, pokud je její tloušťka výrazně větší než délka střední dráhy elektronu v daném materiálu. [3] V praxi to znamená, že tlusté vrstvy mívají tloušťku desítky až stovky mikrometrů. Ač se zdá tato hodnota jako malá, stále je dostatečná na to, aby v materiálu vrstvy nedocházelo k narušování fyzikálních konstant, které platí v materiálech normálních objemů. Z toho plyne, že vlastnosti tlustých vrstev jsou ovlivněny především jejich chemickým složením.

Vzhledem k dostatečné tloušťce těchto vrstev je tato technologie vhodná pro aplikace tam, kde je vyžadována větší mechanická nebo klimatická odolnost, kterou mnohonásobně tenčí tenké vrstvy nemají. Další výhodou této technologie je díky větší tloušťce také to, že jsou tlusté vrstvy jednodušší z hlediska výroby, neboť při výrobním procesu není zapotřebí vakuum. To znamená, že jejich výroba je i mnohem levnější v porovnání s druhou technologií.

Využití této technologie je velmi široké. V elektrotechnice jsou to například tlustovrstvé obvody s tlustovrstvými rezistory a kondenzátory. U rezistorů se dosahuje poměrně přesných hodnot odporu – po výpalu s tolerancí  $\pm 10\%$ , s následným použitím laserového trimování<sup>2</sup> dokonce s tolerancí  $\pm 0,2\%$ . U kondenzátorů se dosahuje tolerance  $\pm 20\%$ . [5]

Tlusté vrstvy jsou vytvářeny zpravidla tiskem pasty na substrát. V praxi se používá nejčastěji sítotisk a šablonový tisk. Oba způsoby vytváření jsou velmi podobné a liší se především tím, že šablona pro šablonový tisk je vytvořena z pevného, tuhého materiálu, který se při samotné tvorbě vrstvy neprohýbá. U sítotisku je naopak síto pružné a při působení tlaku dochází k jeho prohýbání.

---

<sup>2</sup> odstranění materiálu z drážky v tlusté vrstvě pomocí laseru pro dosažení přesnější hodnoty odporu vrstvy

## 1.2 Tenkovrstvé technologie

K tomu, abych definoval, co vlastně tenká vrstva je, mi pomůže definice tlusté vrstvy z kapitoly 1.1. Tenká vrstva je tedy vrstva, jejíž tloušťka není výrazně větší než délka střední dráhy elektronu v daném materiálu. Z tohoto poznatku vyplývá, že vzhledem k velice malé tloušťce nemá na vlastnosti tenké vrstvy zásadní vliv její chemické složení, nýbrž právě její tloušťka. Toto je podpořeno navíc i následkem průběhu depozice vrstvy na substrát, neboť při depozici dochází ke vzniku metastabilních fází. Proto nelze chápat celý výrobek jako substrát a vrstvu zcela odděleně, ale naopak jako celý propojený systém. Tento přístup je velmi důležitý pro zajištění požadovaných vlastností, které jsou zásadní pro správné fungování celé tenké vrstvy. [6]

U vrstevných technologií platí nepřímá úměra mezi tloušťkou vrstvy a náročností její výroby. Tenkovrstvé technologie jsou mnohem náročnější na výrobu, a tedy i nákladnější než technologie tlustovrstvé. To je dáno zejména faktem, že k přípravě tenké vrstvy je zapotřebí vakuum. Samotné udržení dostatečně vysokého vakua při nanášení materiálu na substrát je náročný proces vyžadující speciální zařízení. Tato zařízení jsou ve srovnání se zařízeními používanými pro tlustovrstvé technologie ekonomicky velmi nákladná jak pro prvotní pořízení, tak pro následný provoz a pravidelnou údržbu. Kupní ceny nových zařízení se standardní výbavou se pohybují v řádu milionů korun.

### 1.2.1 Využití tenkovrstvých technologií

V elektrotechnice jsou tenké vrstvy důležité při výrobě tenkovrstvých kondenzátorů a rezistorů. Tyto součástky zaujímají nezastupitelnou pozici na trhu. Tenké vrstvy lze také využít při povrchové úpravě skla nebo případně různých průhledných fólií. V těchto případech mohou tenké vrstvy sloužit k vyhřívání dané plochy Jouleovým teplem nebo ke svádění elektrostatického náboje z nevodivých částí. V dnešní době rozmachu displejů hodinek, monitorů, kalkulaček a samozřejmě mobilních telefonů, které využívají kapalných krystalů, plazmatu či elektroluminiscence, mají tenké vrstvy nezastupitelnou úlohu v předních elektrodách těchto displejů. Tyto elektrody musí být samozřejmě průhledné, aby přes ně byla vidět informace zobrazovaná na displeji. Při úpravě sklíček brýlí se využívá dokonce několika tenkých vrstev. Jsou zde vrstvy, které chrání skla před poškrábáním, vrstvy antireflexní a tzv. easy-to-clean očistné vrstvy, které mají také funkci estetickou. Nyní už se pomalu dostávám k vrstvám optickým, což je sama o sobě velmi rozsáhlá kapitola. Pro příklad zmíním vrstvy antireflexní, jejichž úkolem je snížení odraznosti materiálu. Významné jsou také vrstvy, které mají naopak vysokou odraznost v okolí dané vlnové délky. Takto pokryté materiály se vyznačují lepšími vlastnostmi, než mají kovová zrcadla, a proto jsou tyto vrstvy předurčeny zejména k využití v laserové technice. Dále se tenké vrstvy v optice využívají jako různé filtry (dolní a horní propust, úzkopásmové filtry, děliče světla). Ve strojírenství hraje technologie tenkých vrstev velmi důležitou roli. V tomto odvětví jsou významné zejména vrstvy proti teplotnímu nebo mechanickému přetížení nástroje a vrstvy kluzné. Těmito technologiemi je opatřen prakticky každý vrták a každá fréza či břitová destička. [4,6]

# Kapitola 2

## Tvorba tenkých vrstev

V moderním průmyslu existuje mnoho způsobů, jak vytvořit tenkou vrstvu. Každý tento způsob propůjčí výsledné vrstvě unikátní vlastnosti a hodí se tedy pro určité aplikace více a pro jiné méně. Avšak velké množství těchto výrobních technologií může být použito v mnoha aplikacích. Neexistují ovšem žádné směrnice, podle kterých lze určit, která technologie je ta nejvhodnější. Před tím, než přejdu k popisu konkrétních technologií výroby, je třeba popsat obecný princip vytváření tenkých vrstev, který platí prakticky pro všechny metody, a vybrané vlivy, které na proces působí. [1]

### 2.1 Obecný princip vytváření tenkých vrstev

Nejprve je třeba obstarat vhodné částice, které následně vytvoří tenkou vrstvu. Už tento proces je značně odlišný u různých metod výroby. Rozdílná je podstata získávání těchto částic. Nejčastěji se získávají odpařením materiálu v případě vakuového napařování nebo vyražením z terče z daného materiálu v případě naprašování. Na základě způsobu, kterým jsou potřebné částice získány, se pak proces tvorby mírně liší i v dalších krocích, avšak princip je stále přibližně stejný.

Po získání částic následuje jejich přenos na substrát, na kterém se budou usazovat. Materiál v této fázi může být v pevném, kapalném i plynném skupenství. To záleží právě na způsobu, jakým byly částice získány. V této fázi procesu je velmi důležité vakuum. Pokud by v prostoru, kde probíhá depozice tenké vrstvy, byly molekuly vzduchu, hrozilo by srážení těchto molekul s částicemi materiálu přenášenými na substrát. To by znemožnilo účinný dopad částic a následné tvoření vrstvy. Pokud je tedy zajištěno dostatečné vakuum, energie částice při dopadu na substrát je přibližně stejná jako energie po jejím uvolnění. Podrobněji rozebraný vliv vakua na depozici tenkých vrstev bude v kapitole 2.2.

Při adsorpci<sup>3</sup> na povrchu ztratí částice rychlost a energii. Ztrátu této energie lze vyjádřit akomodačním koeficientem  $\alpha$ . Ten lze vypočítat podle vzorce:

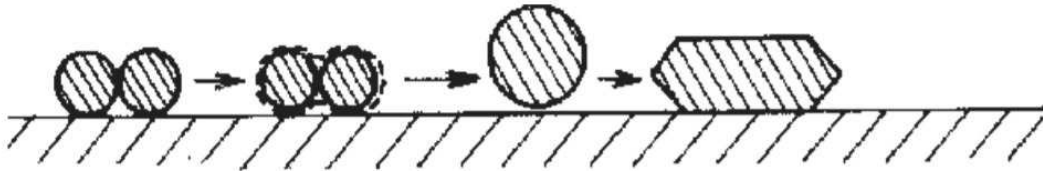
$$\alpha = \frac{T_c - T_v}{T_c - T_s} \quad (1.1)$$

kde  $T_c$  je teplota dopadajících částic,  $T_v$  teplota emitovaných částic a  $T_s$  je teplota substrátu. Hodnoty akomodačního koeficientu se pohybují v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Pokud platí, že  $T_c = T_v$ , pak je akomodační koeficient  $\alpha = 0$  a nastává elastický odraz, tedy žádná částice se na povrchu neudrží a nemůže vzniknout tenká vrstva. Naopak pokud platí, že  $T_s = T_v$ , pak je  $\alpha = 1$  a všechny částice se na povrchu substrátu udrží. Po adsorpci na povrchu se částice vlivem rozdílných teplot  $T_c$  a  $T_s$  dále pohybují. Na celém substrátu ovšem není konstantní pohyblivost atomů. To je dáno

---

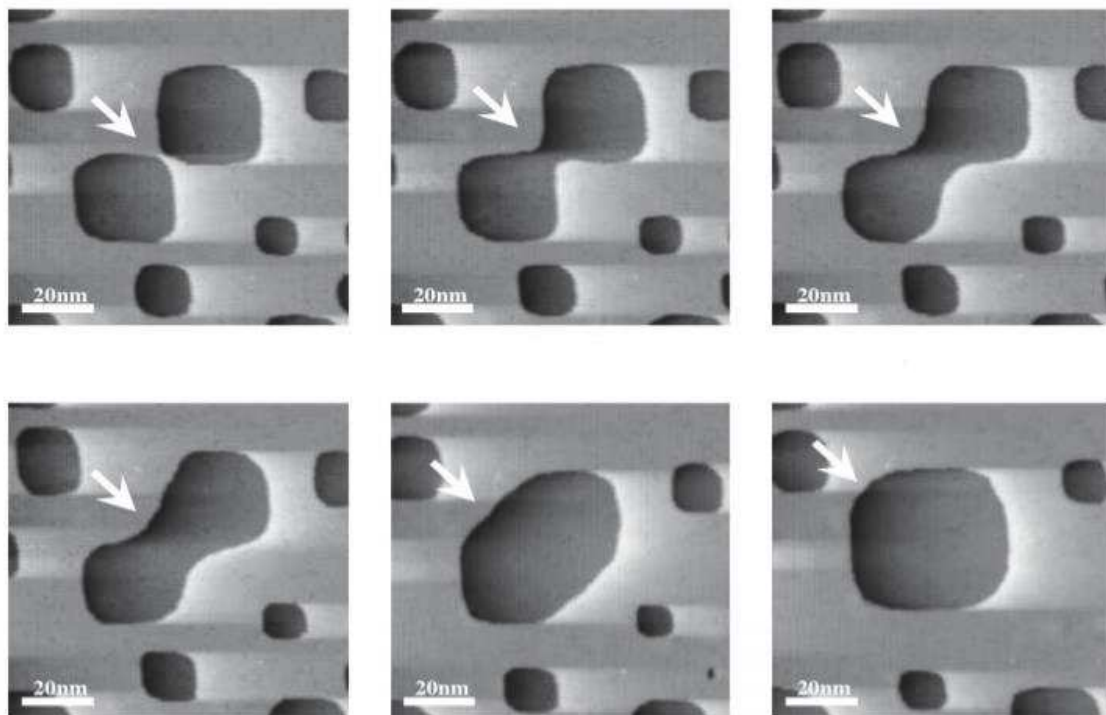
<sup>3</sup> hromadění částic na povrchu

především nedokonalostmi povrchu jako jsou například mikroskopické rýhy nebo schody. Zvyšování pohyblivosti se tedy provádí depozicí mezivrstvy, jejíž povrch je hladší. Například pro vrstvu mědi nebo hliníku se jako materiál pro mezivrstvu využívá nitrid titanu TiN, jenž má podle Mohsovy stupnice tvrdosti stupeň tvrdosti 9 z 10, nebo křemík. Pohyb atomů po povrchu má za následek, že částice mohou narážet do jiných částic. Pokud se dvě částice dotýkají, tak zejména při vyšších teplotách dochází ke spojování těchto částic sintrováním. [7]



Obr. 2.1: Princip spojení dvou částic sintrováním [7]

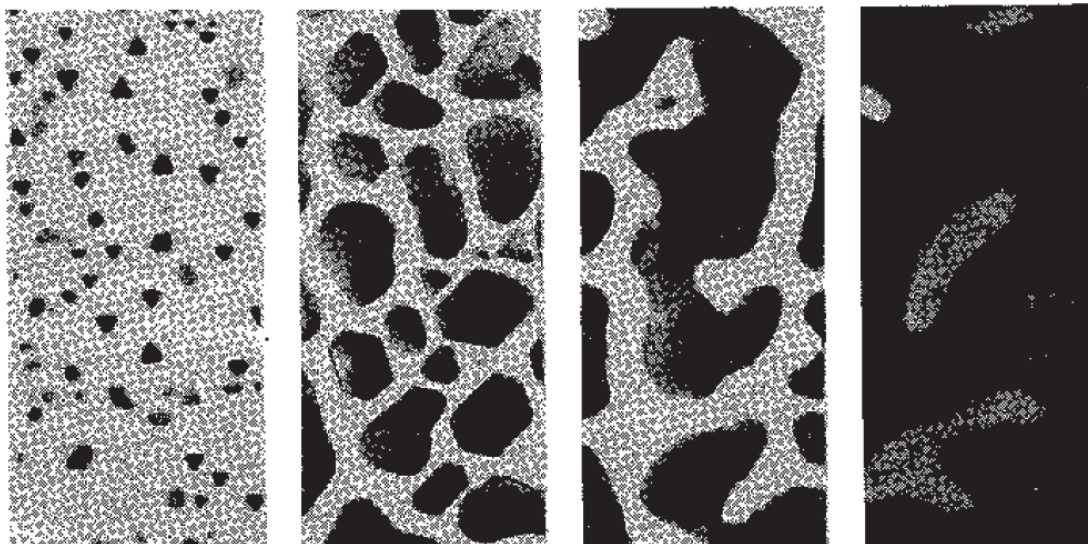
Takto se tedy tvoří zárodky tenké vrstvy zvané nuklea. Jak bylo zmíněno v kapitole 1.2, tyto zárodky jsou značně nestabilní a hrozí jejich rozpad ještě předtím, než se stihnou rozrůst do stabilních rozměrů. Pro správný růst zárodků je potřeba splnit určité podmínky. Zejména čistota povrchu je důležitá, neboť pokud se zárodek vytvoří z části na nečistotě, je značně znehodnocena celková adheze k povrchu a pravděpodobnost zničení zárodku se zvyšuje. Pokud jsou však všechny podmínky splněny a zárodek dosáhne hranice kritické velikosti, stane se stabilním a následuje fáze narůstání ostrůvků povrchovou difuzí a migrací. Během procesu se zvětšuje nejen počet ostrůvků, ale i jejich velikost, a postupně tedy vzájemně srůstají dohromady. Této fázi se říká koalescence. [3,7]



Obr. 2.2: Princip koalescence [8]

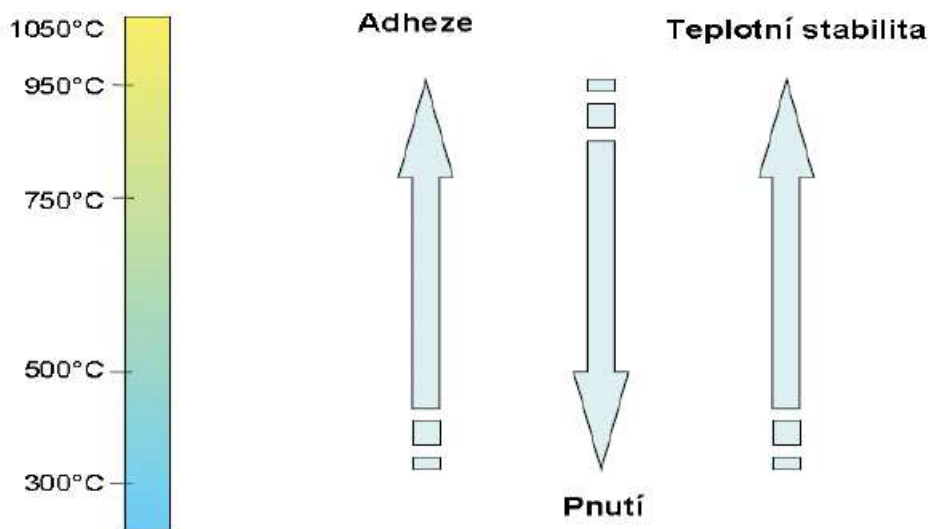


Srůstající zárodky vytvoří kanálkovou strukturu zvanou síťovina, jež obsahuje velké množství mezer. Tyto mezery se vyplní díky dalšímu přísunu částic. Po vyplnění všech mezer vzniká tenká vrstva se souvislým povrchem, jejíž tloušťka se může nadále zvětšovat přísunem dalších atomů. [3,15]



Obr. 2.3: Průběh depozice tenké vrstvy Ag na substrátu z MoS<sub>2</sub> [7]

Celý tento proces může probíhat při různých teplotách, které se odvíjí od způsobu vytváření tenké vrstvy. Teploty se mohou pohybovat od 150 °C až do 1050 °C. Je zřejmé, že takto velký rozdíl teplot má vliv na vlastnosti tenké vrstvy – nižší teplota kladně ovlivňuje pnutí v materiálu a negativně jeho adhezi k substrátu, vyšší teplota tyto parametry ovlivňuje právě naopak. [9]



Obr. 2.4: Vliv teploty na vybrané parametry tenké vrstvy [9]

Vzhledem k náročnosti celého procesu musí být člověk vytvářející takto tenké vrstvy dostatečně zkušený ve fyzice vakua, nauce o materiálech, mechanice, termodynamice i elektromagnetismu a v neposlední řadě i v kinetické teorii plynů a vlastnostech povrchů. [1]

Celý proces vytváření tenkých vrstev je značně zdoluhavý. V praxi je často třeba nanést několik vrstev různých materiálů na sebe, přičemž každá vrstva má jinou úlohu. Nanáš

se vrstvy, které zajišťují odolnost proti korozi nebo oděru, kompenzují pnutí a dilataci nebo zlepšují adhezi dalších vrstev. Počet těchto vrstev a kroků při výrobě obecně závisí na konkrétním produktu a náročnosti jeho výroby. Pro příklad je v Tab. 2.1 zaznamenán počet kroků, které je třeba uskutečnit při výrobě logických integrovaných obvodů v závislosti na použité technologii. Je vidět, že počet vrstev a celkových kroků roste s náročností konkrétní technologie. Množství nanášených vrstev v dané oblasti se pohybuje od 3 do 11 (od základních CMOS/NMOS, přes Schottkyho TTL, ECL, až po HMOS a H-CMOS), avšak tyto hodnoty se v čase mění spolu s modernizací starších a vynalézáním nových, zpravidla náročnějších a kvalitnějších technologií. [1]

Tab. 2.1: Počet kroků potřebných ke zhotovení daných technologií [1]

Depozice	Počet kroků				
	CMOS/NMOS	ECL	Schottkyho TTL	HMOS	H-CMOS
Polysilikon	1	1	-	1-3	2
Epitaxe	-	1	1	-	1
PSG/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1	-	2	1-2	2-3
Hliník	1	2-3	2	1-2	1
Ostatní kovy	-	-	1	1	1-2
Silicidy	-	-	-	0-2	1-2
Celkový počet kroků depozice	3	4-5	6	4-10	8-11

## 2.2 Vliv vakua na depozici tenké vrstvy

Vakuum ovlivňuje střední volnou dráhu částice. Střední volná dráha částice je průměrná délka trajektorie částice, na níž nedojde ke srážce s jinou částicí. [10] Aby bylo možné správně pochopit vliv vakua na celý proces, je třeba s pomocí kinetické teorie plynu odvodit vzorec pro střední volnou dráhu:

V prostoru o objemu  $V$  s koncentrací částic  $N$  se nachází částice plynu o průměru  $d$ , která se rychlostí  $v$  pohybuje uvnitř myšleného válce, jenž je dán průměrem této částice. Ostatní částice v prostoru jsou v klidu, což je podmínka, kterou jsem si stanovil pro zjednodušení výpočtu. Za čas  $dt$  tedy částice urazí vzdálenost  $dx$  podle vzorce:

$$dx = v \cdot dt \quad (2.1)$$

Objem válce  $dV$ , kterým se částice pohybuje, je tedy:

$$dV = \pi \cdot d^2 \cdot dx \quad (2.2)$$

Počet srážek  $s$  za čas  $dt$  je roven počtu částic na jednotku objemu vynásobeným objemem myšleného válce, kterým se pohybuje zkoumaná částice. Je tedy roven:

$$s = \frac{N}{V} \cdot dV = (2) = \frac{N}{V} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot dx \quad (2.3)$$

Střední volnou dráhu / částice tedy lze vypočítat jako podíl vzdálenosti, kterou částice urazí za čas  $dt$  a počtu srážek za tento čas:

$$l = \frac{dx}{s} = (3) = \frac{V \cdot dx}{N \cdot \pi \cdot d^2 \cdot dx} = \frac{V}{N \cdot \pi \cdot d^2} \quad (2.4)$$

Abych mohl určit vliv vakua na tuto veličinu, potřebuji mít ve vzorci tlak plynu  $p$ . K tomu mi pomůže stavová rovnice ideálního plynu, která nám říká, že:

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T \quad (2.5)$$

kde  $p$  je tlak plynu,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je termodynamická teplota plynu. Dosazením rovnice (2.5) do rovnice (2.4) dostaneme:

$$l = \frac{k \cdot T}{\pi \cdot d^2 \cdot p} \quad (2.6)$$

Na začátku odvození jsem si však definoval podmínku, že kromě zkoumané částice jsou všechny ostatní v klidu, což je v reálném prostoru nemožné. Musím tedy přidat korekční člen respektující pohyb všech okolních částic. Finální tvar rovnice je pak:

$$l = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot p} \quad (2.7)$$

Z rovnice (2.7) lze vidět, že střední volná dráha částice je nepřímo úměrná tlaku plynu v prostoru. To znamená, že čím vyšší vakuum se při depozici tenké vrstvy vytvoří, tím delší bude střední volná dráha. S rostoucí střední volnou dráhou klesá pravděpodobnost, že dojde ke srážce molekuly vzduchu s částicí materiálu vytvářené tenké vrstvy, a roste tedy pravděpodobnost, že depozice tenké vrstvy bude úspěšná.

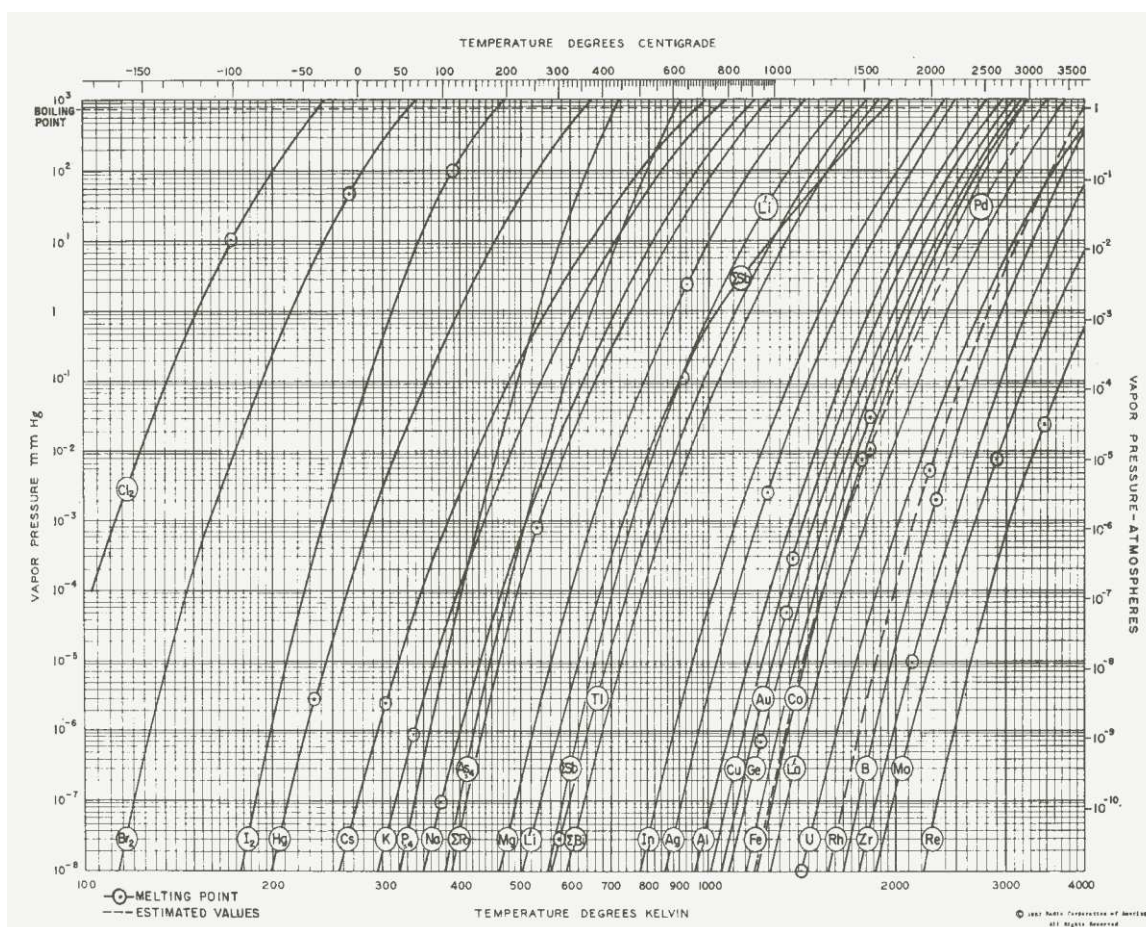
Vakuum může dosahovat různých stupňů dokonalosti. Základní rozdělení stupňů je v Tab.2.2. Při tvorbě tenkých vrstev se v praxi používá nejčastěji střední nebo vysoké vakuum. [12]

Tab. 2.2: Hodnoty intervalů tlaků  $p$  pro jednotlivé stupně dokonalosti vakua [11]

Stupeň vakua	$p$ [mbar]
Atmosférický tlak	1013
Nízké vakuum	3 až $10^3$
Střední vakuum	$10^{-3}$ až 3
Vysoké vakuum	$10^{-8}$ až $10^{-3}$
Ultra vysoké vakuum	$10^{-12}$ až $10^{-8}$
Extrémně vysoké vakuum	méně než $10^{-12}$

Dalším důležitým jevem, který vakuum pozitivně ovlivňuje, je bod tání a bod varu materiálů. Při napařování dochází nejprve k roztavení nanášeného materiálu a následně k jeho odpaření, během kterého se uvolňují atomy, které jsou nanášeny na substrát. Jak lze vidět na Obr. 2.5, kde jsou zobrazeny křivky závislosti teploty tání a varu materiálu na okolním tlaku, vakuum tuto teplotu významně snižuje. V grafu jsou zaznamenány průběhy pro často využívané materiály. Takto nezanedbatelné snížení nejen teploty tání, ale především teploty varu, která je pro procesy nanášení vrstev důležitější, má zásadní dopad na celý průběh depozice tenké vrstvy, neboť pro odpaření nanášeného materiálu není potřeba dosahovat tak vysokých teplot. Vzhledem k této skutečnosti lze použít jako substrát i materiál, který by vysoké teploty

bez využití vakua nevydržel a také by se roztavil. Nižší teplota během celého procesu také pozitivně ovlivňuje některé vlastnosti tenké vrstvy jako například vnitřní pnutí.



Obr. 2.5: Závislosti teploty tání materiálu na okolním tlaku [20]

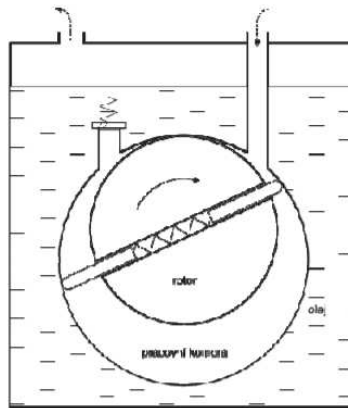
## 2.3 Způsoby získávání vakua

Vakuum se vytváří pomocí vývěv. Vývěva je čerpadlo, které z uzavřeného prostoru odčerpává vzduch, případně jiný plyn. Existuje mnoho druhů těchto zařízení, přičemž každé je vhodné pro vytváření pouze daného typu vakua. To znamená, že vývěva, která dokáže vytvořit velmi vysoké vakuum, je založena často na složitém principu a pracuje velice pomalu. V praxi se tedy v kombinaci s těmito vývěvami využívají pro získání tzv. předvakua i jiné typy vývěv. Ty sice pracují rychle, ale nedokáží vytvořit tak vysoké vakuum, aby bylo možné kvalitně zhotovit tenkou vrstvu. V následující odstavcích si popíšeme příklady nejčastěji používaných vývěv.

### 2.3.1 Rotační olejová vývěva

Jednou z možností, jak vytvořit předvakuum, je využití rotační olejové vývěvy, která je v praxi dnes nejpoužívanější. Tento typ vývěvy obsahuje rotor s lopatkami, pomocí kterých je vzduch nasáván do pracovní komory, kde se stlačuje. Po stlačení na určitou úroveň plyn otevře ventil a unikne z vývěvy. Olej zde slouží jako těsnící, chladící a mazací kapalina. Právě kvalita použitého oleje nejvíce ovlivňuje účinnost této vývěvy. Nevýhodou tohoto zařízení je přítomnost

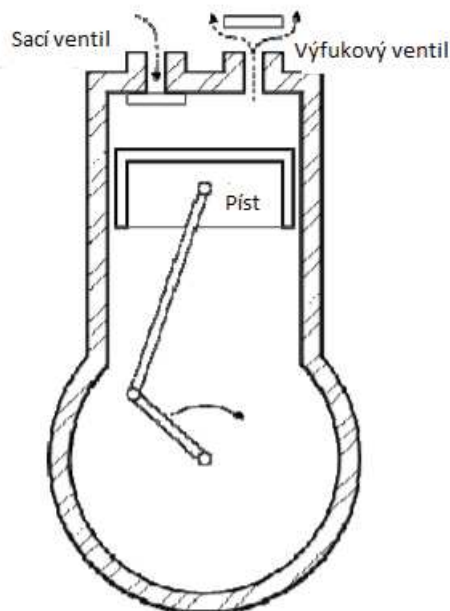
rakovinotvorných par oleje v čerpaném prostoru. Ty vznikají přehříváním oleje při pohybu rotoru. Na výstupu z vývěvy tedy musí být umístěn filtr, případně kouř musí být vyveden z místnosti. Další nevýhodou jsou i značné vibrace, které při čerpání vznikají. [12,13]



Obr. 2.6: Schéma jednokomorové rotační olejové vývěvy [13]

### 2.3.2 Pístová vývěva

Tato vývěva je alternativou pro rotační olejovou vývěvu, zpravidla však nedosahuje tak vysokého vakua. Výhodou je konstrukční i funkční jednoduchost, neboť pracuje na principu pumpy. Nevýhodou pak velký zpětný proud plynu způsobený netěsností pístu a ventilů a zejména nízká čerpací rychlost daná pohybem pístu pouze v jedné ose. Tuto rychlost má rotační olejová vývěva vzhledem ke kruhovému pohybu lopatek výrazně větší. [13]



Obr. 2.7: Schéma pístové vývěvy [13]

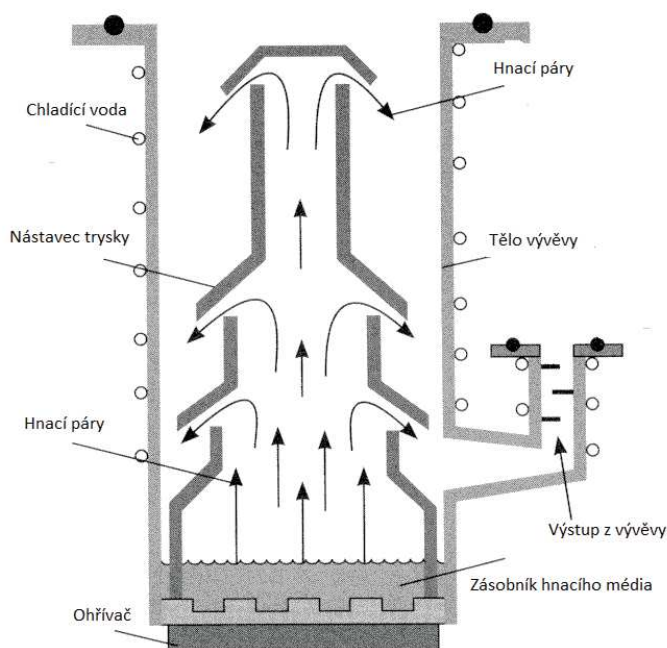
### 2.3.3 Membránová vývěva

Tato vývěva pracuje na podobném principu jako pístová vývěva. Pevný píst je zde však nahrazen pružnou membránou, což zlepšuje těsnost při stlačování plynu. Membrána je nejvíce

zatěžovanou částí celého zařízení a je nutné ji vyrábět z odolných materiálů, které je třeba přizpůsobit i tomu, jak agresivní plyny pomocí nich budou čerpány. V praxi se využívá buď sériového řazení vývěv, jestliže se cílí na snížení konečného mezního tlaku, nebo paralelního řazení, pokud je třeba docílit větší čerpací rychlosti. [13]

### 2.3.4 Difuzní vývěva

Tento typ vývěvy je založen na práci hnací páry, která předává částicím čerpaného plynu energii. Hnací pára se zajistí přivedením média v zásobníku, například oleje, do varu. Vytvořená pára poté proudí nahoru k otvorům (tryskám) v těle vývěvy, které jsou umístěny v jednotlivých stupních. Těmito tryskami pak pára proudí dolů do čerpaného prostoru. Na okrajích proudu hnací pára expanduje, čímž vzrůstá tlak odčerpávaného plynu a ten difunduje do jádra tohoto proudu. Laicky řečeno, rychle proudící pára strhává molekuly plynu. Vzniklá směs páry a plynu poté kondenzuje na stěnách vývěvy, které jsou chlazené. Hnací médium stéká zpět do zásobníku a čerpaný plyn je odváděn pryč z vývěvy. Difuzní vývěvy jsou v praxi velmi často používané, mezi jejich výhody patří zejména to, že nezpůsobují vibrace nebo hluk, neboť uvnitř nejsou žádné pohyblivé části. Nevýhodou je potřeba předvakua, které je nutné vytvořit některou z výše zmíněných vývěv, klesající rychlost čerpání se snižujícím se tlakem a v neposlední řadě i problém s výběrem správného a vhodného typu hnacího média. [12,14]

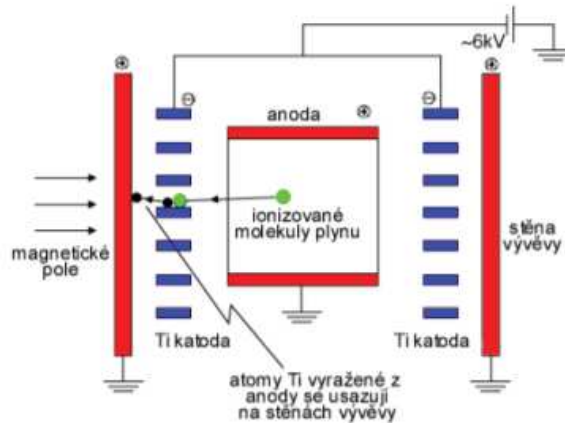


Obr. 2.8: Schéma difuzní vývěvy [17] (upraveno)

### 2.3.5 Iontová vývěva

Tento typ vývěvy je tvořen dvěma katodami a jednou anodou ve tvaru trubice, na níž je přivedeno napětí v řádech kV. Toto napětí vytvoří výboj, jenž rozpráší částice materiálu elektrod do prostoru, kde dojde ke srážce těchto částic s molekulami čerpaného plynu. Tím se molekuly

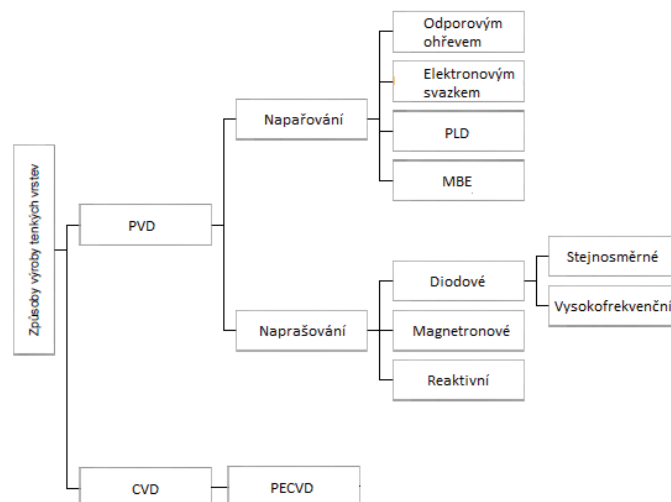
ionizují a jsou následně přitahovány ke katodám z titanu, na nichž se adsorbují. Pro zvýšení pravděpodobnosti srážky daných částic se využívá magnetického pole permanentního magnetu, které zakřivuje trajektorii pohybu rozprášených atomů. Oproti ostatním zařízením je tato varianta poměrně drahá. Další nevýhodou je nutnost obnovovat materiál elektrod. Výhodou je schopnost získat až o 3 řády vyšší vakuum než při použití difuzní vývěvy. [12]



Obr. 2.9: Schéma iontové vývěvy [12]

## 2.4 Technologie vytváření tenkých vrstev

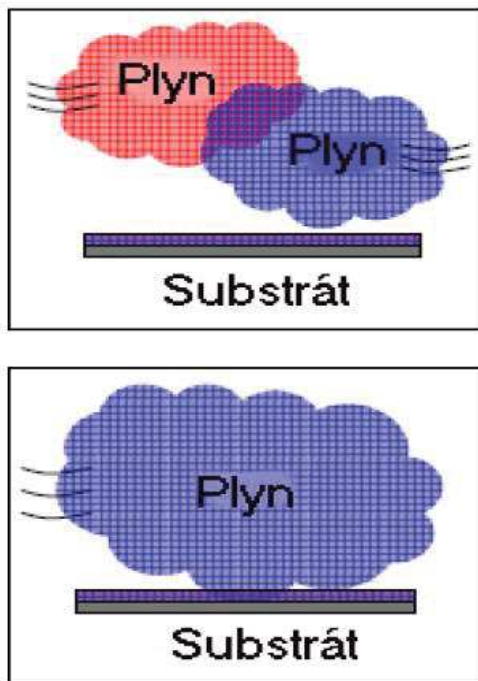
V kapitole 2.1 je popsán obecný průběh tvorby, nyní tedy lze přejít ke konkrétním metodám, kterými se v praxi vytváří tenké vrstvy. Základní rozdělení technologií vytváření tenkých vrstev je zobrazeno ve schématu na Obr. 2.10. Během mnoha let vývoje vzniklo velké množství různých způsobů, jak tenké vrstvy vytvořit. Popsání všech by bylo prakticky nemožné a pro tuto práci i zbytečné, popsány budou tedy jenom ty metody, které jsou v praxi nejpoužívanější, a tedy i nejvýznamnější. Technologie pro výrobu tenkých vrstev se vzájemně liší v mnoha fyzikálních i chemických principech a také v dostupnosti komerčně využívaných zařízení přímo pro danou technologii. Při výběru správného způsobu tvorby je třeba vzít v úvahu několik kritérií zohledňujících vlastnosti nanášeného materiálu i materiálu substrátu, vnější podmínky, kterým bude tenká vrstva vystavena při používání a podobně. [1]



Obr. 2.10: Základní rozdělení technologií pro vytváření tenkých vrstev [3] (upraveno)

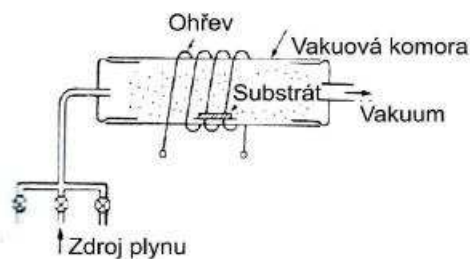
## 2.4.1 CVD

Chemická depozice (z anglického chemical vapor deposition) je založena na heterogenní reakci plynů s povrchem substrátu. Reaktivní směs plynů je zahřata na teplotu kolem 1000 °C a následně přivedena k substrátu, kde se vlivem vysoké teploty rozkládá a reaguje s částicemi povrchu. Takto lze připravit vrstvy kovů, polovodičů a dalších chemických sloučenin v krystalickém i amorfním stavu. Tyto vrstvy jsou pak velice čisté. [6]



Obr. 2.11: Princip chemické depozice [6]

Díky takto vysoké teplotě má vrstva velmi dobré adhezní vlastnosti, které zajišťují její výjimečnou odolnost. Další výhodou je nepochybně i skutečnost, že chemickou depozicí lze nanést tenkou vrstvu i na místech těžko dostupných, jako jsou různé dutiny a drážky. Vysoká teplota má kromě zlepšení adhezních vlastností i negativní dopad na průběh depozice, neboť omezuje výběr materiálu pro substrát. Pokud by byla teplota tání substrátu nižší než teplota, při níž dochází k depozici, substrát by se jednoduše roztavil. Dosažení této teploty je také značně energeticky náročné a celý proces nanesení jedné vrstvy je poměrně dlouhý, trvá přibližně 8 až 10 hodin. [6]



Obr. 2.12: Schéma sestavy pro chemickou depozici [3]

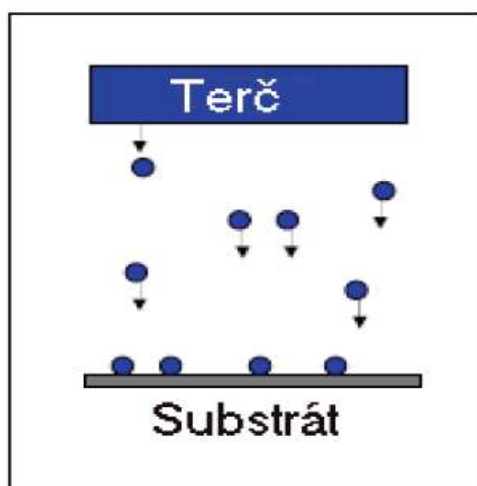


## 2.4.2 PECVD

Plasmaticky aktivovaná CVD metoda je modifikací klasické CVD metody. Je zde využito ionizace reaktivních plynů v plazmatickém výboji, což má za následek větší reaktivitu těchto plynů. Lze tedy nanášet vrstvu při podstatně nižších teplotách. To umožňuje širší výběr materiálů, na které se vrstva bude nanášet. Nevýhodou použití plazmatického výboje je skutečnost, že výsledná vrstva není tak čistá jako bez použití daného výboje. I přes to je tato technologie v praxi velmi využívána. [4,6]

## 2.4.3 PVD

Fyzikální depozice (z anglického physical vapor deposition) je na rozdíl od CVD založena na získávání částic z materiálu v pevném stavu. Toho je možné docílit dvěma způsoby. Prvním je napařování, jehož podstatou je odpaření materiálu, který se následně v plynném skupenství transportuje na substrát. Druhým pak naprašování, které je založeno na principu rozprašování materiálu výbojem. Proti CVD má PVD mnoho výhod. Jelikož není použito žádných toxických plynů, je tato technologie ekologicky šetrnější. Je také možné nanést více vrstev různých materiálů na sebe, jednotlivé vrstvy jsou podstatně tenčí, jejich tloušťka je snadno reprodukovatelná a především přesně nastavitelná. [6]



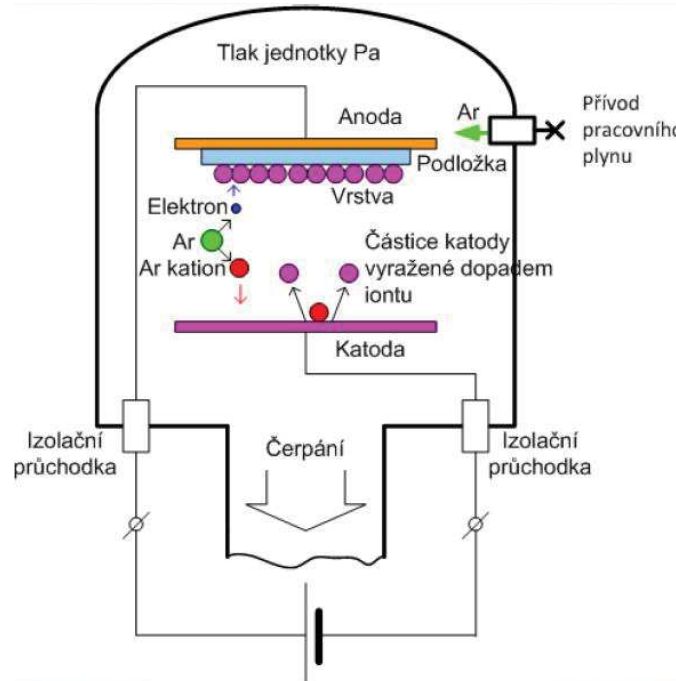
Obr. 2.13: Princip fyzikální depozice [6]

Depozice tenké vrstvy touto technologií probíhá při nižší teplotě, maximálně 500 °C. Je zde potřeba dosáhnout vyššího vakua. Vzhledem k nižším teplotám lze nanášet vrstvy i na polypropylenové nebo polyethylenové fólie, které mají tloušťku řádově jednotky mikrometrů. Při teplotách používaných při CVD by došlo k nenávratné degradaci daných fólií. [6]

## 2.4.4 Naprašování

Základem této techniky je bombardování povrchu terče ionty pracovního plynu při tlaku v recipientu v řádu jednotek Pa. Tento terč je vyroben z materiálu, který bude tvořit vzniklou tenkou vrstvu. Dopadem iontů na terč dojde k vyražení atomů tohoto materiálu a jejich následnému transportu k substrátu, který se nachází nad terčem. Obrazec, který na substrátu vzniká, je vymezen maskou, jež je přiložena k podložce a zakrývá části substrátu, které nemají být vystaveny dopadům vyražených atomů. Aby mohl popsáný proces fungovat, je třeba vytvořit stejnosměrný doutnavý výboj, který zajišťují dvě elektrody, na které je přivedeno napětí.

V tomto výboji pak mohou částice pracovního plynu, často se využívá argonu, disociovat na elektrony a kladné ionty. Tyto ionty následně dopadají na terč, který je v systému katodou. Elektrony se naopak pohybují k anodě, ale vzhledem k jejich velmi malé hmotnosti nezpůsobí žádnou emisi dalších atomů. Existuje mnoho modifikací, které více či méně upravují a vylepšují výše popsané uspořádání. Popis vybraných variant bude v kapitolách 2.4.5 až 2.4.8. [15,19]



Obr. 2.14: Princip naprašování [19]

#### 2.4.5 Diodové stejnosměrné naprašování

Pro použití tohoto způsobu je nutné pracovat pouze s terčem z vodivých materiálů, neboť terč je v tomto případě katodou a je třeba na něj přivést stejnosměrné napětí. Pokud by byla katoda z dielektrického materiálu, doutnavý výboj potřebný k rozprášení materiálu by zanikl, neboť by došlo k nahromadění nabitých částic na povrchu terče. Ten by se tedy choval jako kondenzátor. K úspěšnému průběhu depozice je nutné dodržet několik podmínek. Jedná se zejména o přivedené napětí, které se musí pohybovat v řádu kV, odpor mezi anodou a katodou, jenž musí být v řádech k $\Omega$ , a zejména tlak v recipientu. Pokud by byl tlak příliš nízký, nebylo by možné udržet doutnavý výboj, pokud by byl naopak příliš vysoký, docházelo by k mnoha srážkám deponovaných částic s molekulami vzduchu. Ty by zapříčinily pokles energie těchto částic, a tedy zhoršení kvality nanášené vrstvy. Ideální tlak vzduchu je tedy v řádu jednotek až desítek Pa. [3,21]

#### 2.4.6 Diodové vysokofrekvenční naprašování

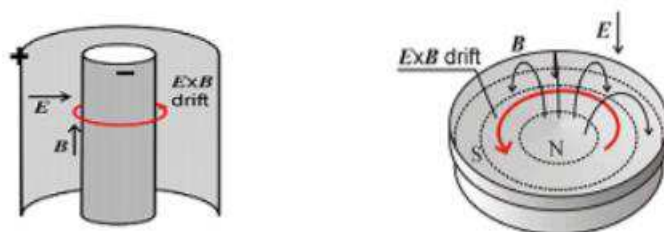
Tato metoda na rozdíl od předchozí umožňuje naprašovat i dielektrické materiály. Jak bylo popsáno v kapitole 2.4.5, z terče z dielektrického materiálu se po přivedení napětí stane kondenzátor. Pokud je toto napětí ale střídavé o dostatečně vysoké frekvenci, dochází vlivem změny polarity napětí k nabíjení a vybíjení, které zajistí vyrážení částic z terče. V průměru se

běžně používá taková frekvence, že se polarita mění každých 74 ns. To odpovídá přibližně frekvenci 13,56 MHz. Takhle rychlou změnu polarity zvládnou sledovat pouze elektrony, které jsou na rozdíl od kladných iontů výrazně pohyblivější. Během jedné půlperrody tedy dochází pouze k odstranění náboje ve formě elektronů, během půlperrody druhé pak k vyrazení částic z terče. Aby tato metoda byla použitelná, je nutné přivést na terč navíc předpětí ve formě stejnosměrného napětí. Vysokofrekvenční naprašování se využívá k deponování materiálů z keramických terčů a vzhledem k snadné výrobě kompozitních terčů také k naprašování směsí materiálů. [3,21,22]

#### 2.4.7 Magnetronové naprašování

Princip této techniky je totožný se základním naprašování, jediným rozdílem je přidání magnetronu do systému. Magnetron, zpravidla silné trvalé magnety, vytváří magnetické pole, které způsobí zakřivení dráhy elektronů plazmatu ve směru vektorového součinu  $E \times B$  (tzv.  $E \times B$  drift, který je schematicky znázorněn na Obr. 2.15), kde  $E$  je vektor intenzity elektrického pole a  $B$  je vektor magnetické indukce. Toto zakřivení prodlužuje dráhu elektronů a tím dochází ke zvýšení počtu jejich srážek a vytvoření hustého plazmatu. Zvýší se tedy hustota proudu na katodě, a tudíž i počet vyražených částic. Výhodou použití magnetronu je fakt, že pro depozici postačí tlak pracovního plynu v řádu jednotek Pa. Nevýhodou této metody je naopak to, že v blízkosti kovových částí se částicím materiálu ztlačí dráha letu a nanosená vrstva v blízkosti kovu je nekvalitní. Je proto třeba vybrat vhodnou masku a substrát, aby nedošlo k znehodnocení celého průběhu depozice. [3,6,19,23]

Magnetron je běžně konstruován buď jako rovinný, nebo jako válcový. Obě varianty se liší tvarem, avšak fyzikální princip zůstává shodný. Obě konstrukční varianty jsou znázorněny na Obr. 2.15.



Obr. 2.15: Příklady konstrukcí válcového magnetronu (vlevo) a rovinného magnetronu (vpravo) s červeně znázorněným  $E \times B$  driftem [23] (upraveno)

#### 2.4.8 Reaktivní naprašování

V této technologii přípravy tenkých vrstev se navíc využívá plynu, který je do recipientu napuštěn spolu s pracovním plynem. Tento nový plyn, často dusík nebo kyslík, reaguje s materiálem terče a podle použitého plynu vznikají buď nitridy nebo oxidy. Další významnou výhodou tohoto způsobu je také skutečnost, že nastavováním tlaků jednotlivých napouštěných plynů lze velmi dobře ovlivňovat vlastnosti vznikající tenké vrstvy. [30]

## 2.4.9 Napařování

Při využití této technologie vzniká tenká vrstva z plynné fáze materiálu. Oproti napařování je v této technice obecně zapotřebí vyššího vakua v řádu mPa. Napařovaný materiál je nejprve umístěn do zdroje, ve kterém je zahřát na tak vysokou teplotu, aby došlo k odpaření. Tato teplota samozřejmě závisí na použitém materiálu a lze ji dosáhnout různými způsoby. Odpařené částice se pohybují směrem k substrátu, který se nachází přímo nad zdrojem, z kterého se materiál odpařil. Zde páry kondenzují a vytváří tenkou vrstvu. Zdroje se liší podle použité varianty této techniky. Při využití Jouleova tepla, tedy při odporovém ohřevu, je zdrojem vodivá spirálka, do které je umístěn odpařovaný materiál. Spirálka je následně zahřáta průchodem elektrického proudu na vysokou teplotu a dojde k odpaření materiálu v ní. Naprosto zásadní je, aby byla teplota tání materiálu spirály podstatně vyšší než teplota tání odpařovaného materiálu, který současně nemůže jakkoliv reagovat s materiálem spirálky, neboť by mohlo dojít k znehodnocení vznikající tenké vrstvy.



Obr. 2.16: Spirálka pro napařování odporovým ohřevem [3] (upraveno)

Odporovým ohřevem nelze kvalitně napařit různé slitiny, neboť jejich jednotlivé složky mají různé teploty tání a došlo by ke kondenzaci jednotlivých složek zvláště podle toho, jak rychle byly odpařeny. K řešení tohoto problému je možné využít odpaření například vybitím velkého kondenzátoru do materiálu, který se následkem toho odpaří tak rychle, že se jednotlivé složky slitiny nestihnou rozdistribuuovat. Stechiometrie tenké vrstvy je potom stejná jako stochiometrie odpařovaného materiálu. Kromě vybití kondenzátoru lze pro výrobu vrstev ze slitin také efektivně využít elektronový svazek. Tento děj je však náročnější než napařování odporovým ohřevem. [15,18]

## 2.4.10 PLD

Princip PLD (pulzní laserové depozice) je podobný klasickému napařování. Liší se především ve způsobu, jakým získáváme nanášené atomy. Ty jsou uvolňovány pomocí laseru, jehož částice dopadají na odpařovaný materiál a potřebné atomy se následně uvolňují v podobě plazmového obláčku. Výhodou této technologie je zejména fakt, že pomocí ní lze nanášet velmi široké spektrum materiálů, nevýhodou je pak skutečnost, že takto nanášet materiál lze pouze na malý povrch. [31,32]

## 2.4.11 MBE

MBE je zkratka pro technologii zvanou epitaxie z molekulárních svazků. Epitaxie je obecně krystalický růst na obvykle monokrystalické podložce. Umožňuje přípravu velmi kvalitních heterostrukturálních a nanostrukturálních materiálů. Hlavním rozdílem oproti ostatním metodám napařování je skutečnost, že pomocí epitaxie z molekulárních svazků vzniká krystalická vrstva. Při využití technik popsaných výše vzniká naopak vrstva amorfní. Princip této technologie spočívá

v předehřátí substrátu na vysokou teplotu v ultra vysokém vakuu, přičemž dojde k odstranění veškerých nečistot jako oxidů a různých adsorbovaných látek a povrch substrátu se tak stane atomárně čistým. Částice, které na substrát poté dopadají, se tedy zapojují přímo do krystalické mřížky substrátu. Důležitý je fakt, že mezi částicemi při pohybu k substrátu nedochází k žádným srážkám. [33,34]

# Kapitola 3

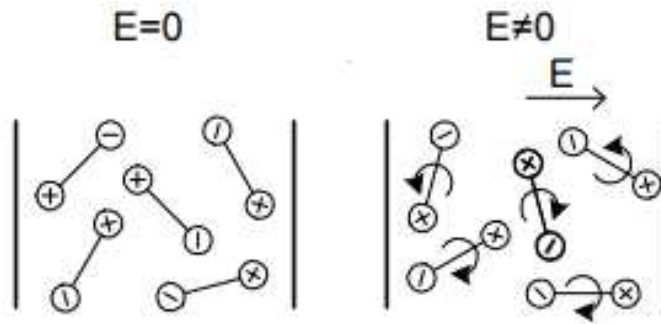
## Vlastnosti tenkých vrstev

Vlastnosti tenkých vrstev lze pro naši práci rozdělit na mechanické (např. tloušťka a homogenita vrstvy, adheze vrstvy k substrátu nebo vnitřní pnutí), které se zkoumají u všech typů vrstev, a elektrické. Ty závisí na materiálu, z kterého je vrstva vyrobena. Při použití dielektrických materiálů patří mezi důležité vlastnosti zejména kapacita, permitivita a ztrátový činitel. Při tvorbě vodivých, respektive odporových vrstev je zkoumána především vodivost, respektive rezistivita. Vzhledem ke skutečnosti, že cílem této práce je zkoumání dielektrických vrstev, bude tato část pojednávat pouze o elektrických vlastnostech tohoto typu tenkých vrstev.

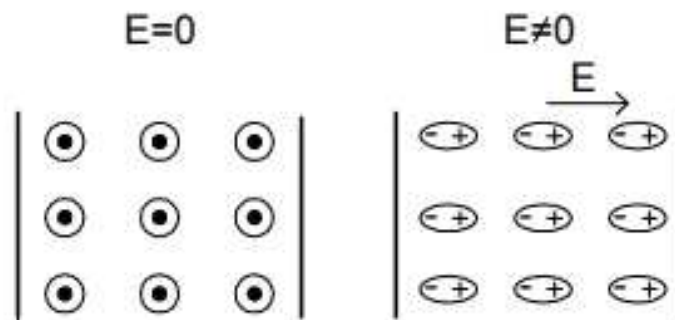
Je třeba zdůraznit, že některé vlastnosti jako permitivita nebo vodivost jsou v některých případech významně ovlivněny tloušťkou vrstvy. U objemových materiálů, tedy pokud se rozměry vzorku pohybují minimálně v řádu desítek mikrometrů, se neuplatňuje povrch vrstvy, neboť ta je dostatečně silná a povrch lze v tomto případě zanedbat. Permitivita dvou vzorků z naprosto totožného materiálu, přičemž první vzorek je vysoký 1 cm a druhý 5 cm, je tedy stejná, neboť je naprosto nezávislá na dané tloušťce a ovlivňuje ji pouze samotný materiál. Totéž ovšem neplatí u velmi tenkých vrstev, které mají tloušťku v řádu nanometrů. Zde už nelze zanedbat povrch vrstvy, protože ten zmíněné vlastnosti ovlivňuje. Předtím, než budou tyto vlastnosti popsány podrobněji, je ovšem třeba popsat samotný dielektrický materiál.

### 3.1 Dielektrikum

Dielektrika můžeme rozdělit na polární a nepolární. Jako polární označujeme takové materiály, jejichž molekuly mají kladné a záporné náboje rozloženy takovým způsobem, že jako celek vykazují vlastnosti elektrického dipólu. Tyto dipóly jsou při absenci vnějšího elektrického pole chaoticky natočeny tak, že výsledná elektrická intenzita všech těchto dipólů je nulová. Nepolární dielektrika jsou materiály, jejichž částice nevykazují dipólové vlastnosti. Základní podstatou každého dielektrického materiálu je schopnost polarizace po vložení do elektrického pole. Samotný průběh polarizace se ovšem liší v závislosti na druhu dielektrika. Při polarizaci polárního dielektrika (orientační nebo dipólová polarizace) dochází k natočení původně chaoticky natočených dipólů ve směru intenzity vnějšího elektrického pole. Tento děj je znázorněn na Obr. 3.1. Jelikož u nepolárních dielektrik neexistují žádné dipóly, které by vnější elektrické pole natočilo do daného směru, probíhá celý proces odlišně. Působením elektrického pole dojde k posunutí těžiště kladného náboje k záporné polaritě pole a těžiště záporného náboje naopak ke kladné polaritě pole (elektronová polarizace). Tato situace je zachycena na Obr. 3.2. [3,24,35]

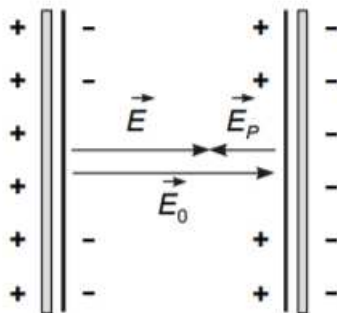


Obr. 3.1: Polární dielektrikum před vložením do elektrického pole (vlevo) a po vložení do elektrického pole o intenzitě  $E$  (vpravo) [35]



Obr. 3.2: Nepolární dielektrikum před vložením do elektrického pole (vlevo) a po vložení do elektrického pole o intenzitě  $E$  (vpravo) [35]

Z Obr. 3.1 i 3.2 lze vidět, že v obou případech vznikne nové elektrické pole uvnitř materiálu, které působí proti směru vnějšího elektrického pole a zeslabuje jeho účinek. Toto zeslabení vnějšího pole polem vnitřním je zakresleno na Obr. 3.3. Původní vnější pole o intenzitě  $E_0$  je zeslabeno vyvolaným vnitřním polem o intenzitě  $E_p$ . Výsledné elektrické pole má tedy intenzitu  $E$ , přičemž platí, že  $E < E_0$ .



Obr. 3.3: Vzájemné působení vnitřního a vnějšího elektrického pole v dielektriku [25]

Hodnoty elektrických intenzit  $E$  a  $E_0$  budou důležité při definici permitivity v kapitole 3.3.1.

## 3.2 Mechanické vlastnosti tenkých vrstev

V této části už lze přejít ke konkrétním veličinám, které se dají na jednotlivých tenkých vrstvách měřit. Nejprve se budu věnovat mechanickým vlastnostem jako je tloušťka, homogenita a adheze.

### 3.2.1 Tloušťka

Už z termínu tenká vrstva je zřejmé, že tloušťka je v této technologii jednou z nejzásadnějších vlastností. Definuje veškeré děje, které v takto tenkých materiálech probíhají. Jak bylo nastíněno v úvodu kapitoly 3, v tenké vrstvě neplatí tytéž fyzikální zákony jako v makroskopickém světě, neboť průmyslově vyráběné tenké vrstvy mají tloušťku v řádech nanometrů. I v takto malých rozměrech je ovšem potřeba relativně přesně dodržet konstantní tloušťku na celém povrchu vrstvy. Při určitých metodách výroby dochází k tzv. stínovému efektu. Stínový efekt způsobuje nerovnoměrné rozložení vyrobené tenké vrstvy na substrátu, a to kvůli přímočarému pohybu odpařených částic. Nejtlustší vrstva tedy vzniká přímo nad terčem, z kterého se částice odpařují, a směrem ke krajům substrátu postupně slábne. Pokud není substrát rovný a objevují se na něm určitá zakřivení, které zabrání přímočaře letícím atomům dopadnout na skrytá místa, nevytvoří se na těchto místech dokonce žádná vrstva. Tomu je možné se částečně bránit napuštěním pracovního plynu, často argonu, do recipientu. Srážky odpařených částic s částicemi pracovního plynu způsobí zakřivení pohybu atomů letících z terče na substrát a dojde tedy k rovnoměrnějšímu nanesení tenké vrstvy. Je ovšem třeba dbát na tlak pracovního plynu. Pokud by v recipientu bylo plynu příliš, docházelo by k nadměrnému počtu srážek, které by odpařené částice výrazně zpomalovaly a znemožnily tak účinný dopad na substrát.

### 3.2.2 Homogenita a vnitřní pnutí

Jedním ze základních požadavků při výrobě tenkých vrstev je, aby byla vrstva ve všech místech stejná. Takto ideálního stavu v praxi nikdy docílit nejde, avšak lepší homogenitu zajistí pohyb substrátu. Pokud by na jednu polovinu substrátu dopadalo znatelně více nanášených částic než na polovinu druhou, lze tento nedostatek eliminovat rotačním pohybem substrátu. [3,26]

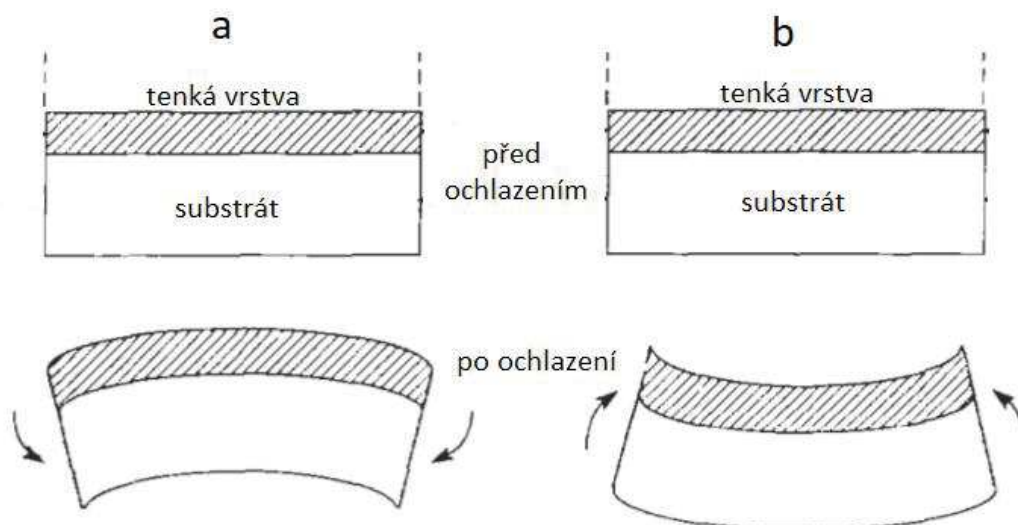
Vnitřní pnutí je způsobeno nerovnoměrnou plastickou deformací. V tomto případě k ní dochází zejména vlivem tepelného zpracování materiálů, neboť při výrobě jsou substrát i nanášené částice vystaveny vysokým teplotám. Nejdůležitějším faktorem je koeficient teplotní roztažnosti. Jestliže je koeficient teplotní roztažnosti substrátu a nanášené tenké vrstvy značně rozdílný, dochází při vychladnutí výrobku ke smrštění v nestejném poměru a vznikne tím vnitřní pnutí, které se snaží výrobek ohnout. [27] Následkem toho může dojít k prasklinám a celkovému poničení výrobku. Změna délky materiálu je přímo úměrná koeficientu teplotní roztažnosti podle následujícího vzorce:

$$\Delta L = L \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

kde  $\Delta L$  je změna délky materiálu,  $L$  je původní délka,  $\beta$  je koeficient teplotní roztažnosti a  $\Delta T$  je změna teploty, během které ke změně délky došlo. Pokud tedy má materiál substrátu větší koeficient teplotní roztažnosti  $\beta$  než materiál nanášené vrstvy, bude mít substrát po ochlazení menší rozměry než vrstva a bude se ji snažit ohnout. Tato situace je znázorněna na Obr. 3.4a.



Pokud má naopak substrát menší koeficient teplotní roztažnosti než tenká vrstva, bude se analogicky snažit ohnout vrstva substrát (Obr. 3.4b).



Obr. 3.4: Vznik vnitřního pnutí na rozhraní substrát-vrstva při ochlazení [27] (upraveno)

Při výrobě především velkých výrobků je tedy potřeba brát v úvahu koeficienty teplotní roztažnosti jednotlivých materiálů a snažit se, aby byly přibližně stejné. Ze vztahu (3.1) je také zřejmé, že čím vyšší teplotě je výrobek při výrobě vystaven, tím většímu pnutí je následně po vychladnutí vystaven.

### 3.2.3 Adheze

Dostatečná adheze (přilnavost) nanesené tenké vrstvy k substrátu je pro celkovou kvalitu vrstvy nesmírně důležitá. Tento aspekt závisí především na materiálu vrstvy i substrátu. Při velkém vnitřním pnutí popsaném v předchozí části je systém substrát-vrstva velmi namáhán a při nedostatečné adhezi se může vrstva odlepit. Velice důležitý pro přilnavost materiálů je povrch substrátu. Ten je před depozicí upravován tak, aby bylo dosaženo co nejčistšího a nejrovnějšího povrchu. Zásadní je také počáteční stádium růstu vrstvy. Jestliže se vytvoří chemické vazby se substrátem, je adheze vzniklé tenké vrstvy větší, než pokud jsou vazby založeny pouze na fyzikálních vazbách. Často se před samotným nanášením hlavní vrstvy deponuje mezivrstva, která zajistí lepší adhezi následně nanášené vrstvy. Obecně lze konstatovat, že čím vyšší teplotě je při výrobě vzorek vystaven, tím je adheze systému větší, neboť dojde k hlubšímu propojení obou materiálů. [3,15]

## 3.3 Elektrické vlastnosti tenkých vrstev

V rámci této práce budu zkoumat pouze tenké vrstvy z dielektrických materiálů. V následujících odstavcích tedy popíši nejdůležitější veličiny, konkrétně permitivitu, kapacitu a ztrátový činitel.

### 3.3.1 Permitivita

V odstavci 3.1 při definici dielektrika a polarizace byly zmíněny důležité hodnoty elektrických intenzit  $E_0$  a  $E$ , tedy intenzity vnějšího elektrického pole a elektrického pole uvnitř

dielektrika zeslabeného polarizací. Poměr  $E_0$  ku  $E$  vyjadřuje bezrozměrnou konstantu, která nese označení relativní permitivita  $\epsilon_r$ . Je to materiálová konstanta, která říká, jak je materiál schopen zeslabovat vnější elektrické pole a také zvyšovat kapacitu, což znamená uchovávat energii. Termín kapacita bude definován v kapitole 3.3.2. Relativní permitivita závisí na dipólovém momentu částice, množství dipólových momentů v jednotce objemu a schopnosti dipólů se natáčet. Lze konstatovat, že pro všechny materiály v pevném, kapalném a plynném skupenství platí  $\epsilon_r > 1$ . Relativní permitivita je rovna 1 pouze v případě vakua. Permitivita vakua je velmi často používaná konstanta s označením  $\epsilon_0$  a hodnotou přibližně  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ . Je třeba chápat rozdíl mezi permitivitou a relativní permitivitou. Permitivita na rozdíl od relativní permitivity není bezrozměrná veličina, označuje se  $\epsilon$  a lze ji spočítat jako součin relativní permitivity daného materiálu a permitivity vakua. Permitivita je jedním ze základních parametrů každého dielektrika a v podstatě říká, jak který materiál dokáže skladovat energii. Z předchozích řádků také plyne, že každý materiál má vyšší permitivitu než vakuum. [3,28]

Důležitým faktorem, který permitivitu materiálu v určitých případech ovlivňuje, je frekvence zdroje, ke kterému je kondenzátor s dielektrikem připojen. Nepolární dielektrika jsou na kmitočtu nezávislá, ovšem u polárních je to jinak. Pokud je frekvence zdroje při polarizaci polárního dielektrika příliš vysoká, nestačí se před změnou polarity napětí dipóly natočit až do krajních poloh. Z toho vyplývá, že se zmenší intenzita elektrického pole uvnitř dielektrika, a tím pádem nedojde k tak velkému zeslabení vnějšího elektrického pole. Vzhledem k této skutečnosti je zřejmé, že permitivita polárních dielektrik při zvyšujícím se kmitočtu klesá. [35]

### 3.3.2 Kapacita

Kapacita kondenzátoru je veličina, která udává vztah mezi velikostí elektrického náboje na elektrodách daného kondenzátoru a napětím mezi nimi. Velikost tohoto náboje je tedy přímo úměrná velikosti přivedeného napětí, přičemž konstantou úměrnosti je právě kapacita materiálu umístěného mezi elektrodami. [29] Pro pozdější výpočty je ovšem třeba odvodit vzorec s jinými veličinami. Výše slovy popsaný vztah zapíše jako:

$$Q = C \cdot U \quad (3.2)$$

kde  $Q$  je náboj na elektrodách,  $C$  je kapacita kondenzátoru a  $U$  je napětí přivedené na elektrody. Pro další kroky nyní definuji náboj  $Q$ , který vznikl přivedením pomyslného napětí na elektrody a jenž mezi deskami kondenzátoru vytvoří elektrické pole. Gaussova věta elektrostatiky pro toto pole definuje vztah:

$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon} \quad (3.3)$$

kde  $\oiint_S \mathbf{E}$  je tok vektoru intenzity elektrického pole uzavřenou plochou  $S$  (v tomto případě plochou desek kondenzátorů),  $Q$  je náboj a  $\epsilon$  je permitivita prostředí mezi deskami kondenzátoru. V tomto případě lze vztah (3.3) zbavit integrálu a intenzita elektrického pole se pak vypočítá podle:

$$E = \frac{Q}{\epsilon \cdot S} = konst \quad (3.4)$$

Z těchto veličin lze zpětně dopočítat pomyslné napětí, které bylo přivedeno na elektrody a vybudilo náboj  $Q$ . Obecný vzorec pro napětí ve stacionárním poli je:

$$U = \int_{y=0}^{y=d} E(y) \cdot dy \quad (3.5)$$

kde  $x$  je obecná rozměrová veličina. Dosazením vztahu (3.4) do (3.5) vyjde vztah:

$$U = \int_{x=0}^{x=d} E(x) \cdot dx = \frac{Q}{\varepsilon \cdot S} \cdot \int_{x=0}^{x=d} dx = \frac{Q \cdot d}{\varepsilon \cdot S} \quad (3.6)$$

kde  $d$  je vzdálenost desek kondenzátoru, tedy šířka dielektrika mezi deskami. Po dosazení vzorce (3.6) do (3.2) lze po drobných úpravách napsat vztah pro kapacitu  $C$ :

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \quad (3.7)$$

Ze vzorce (3.7) plyne skutečnost, že kapacita kondenzátoru je přímo úměrná ploše jeho desek a permitivitě materiálu vloženého mezi tyto desky a nepřímo úměrná vzdálenosti jeho desek. Vzhledem k tomu, že materiál mezi deskami bude ve formě tenké vrstvy, lze předpokládat, že hodnoty kapacit budou relativně vysoké. Hodnoty kapacity jsou však shora omezeny elektrickou pevností nedeponovaných materiálů, neboť příliš tenké vrstvy by mohly být poškozeny přivedeným napětím. [3] Ze vzorce (3.7) vyplývá, že ze změřené kapacity lze dopočítat tloušťku tenké vrstvy, pokud by bylo její přímé měření nepřesné. To je vzhledem ke skutečnosti, že substráty použité pro tuto bakalářskou práci jsou skleněné, poměrně pravděpodobné. Tloušťku vrstvy pak tedy lze vypočítat ze vzorce (3.7) jako:

$$d = \frac{\varepsilon \cdot S}{C} \quad (3.8)$$

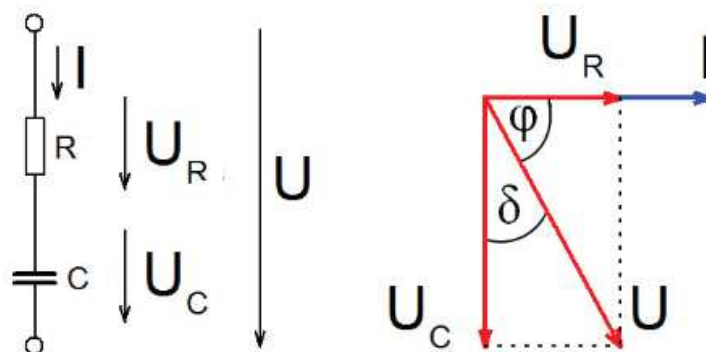
Takto získané výsledky je pak možné porovnat s výsledky naměřené přímou metodou popsanou v kapitole 4.3.1.

### 3.3.3 Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$

Po připojení kondenzátoru ke zdroji střídavého napětí se bude měnit i elektrické pole uvnitř kondenzátoru. To znamená, že proces polarizace popsany v kapitole 3.1 bude neustále probíhat spolu se střídáním elektrického pole a budou se tedy měnit i polohy elementárních částic v dielektriku kondenzátoru. S tímto jevem jsou spojeny patřičné ztráty. U elektronové polarizace nepolárních dielektrik je možné tyto ztráty zanedbat, neboť je tento typ polarizace způsoben pouze deformací elektronových drah atomů, což je velmi rychlý a energeticky nenáročný proces. Naopak při dipólové polarizaci polárních dielektrik dochází k podstatným ztrátám kvůli vnitřnímu tření. To je dáno tím, že dochází k natáčení celých dipólů a v tomto pohybu jim brání prostředí materiálu. Je tedy zřejmé, že tyto ztráty jsou závislé na viskozitě materiálu, a tedy na teplotě, při níž k polarizaci dochází, neboť viskozita se snižuje se vzrůstající teplotou. [35]

Celkové ztráty v kondenzátoru jsou tvořeny nejen dielektrickými ztrátami v dielektriku, které jsou závislé na frekvenci, ale i ztrátami způsobenými průchodem svodového proudu mezi elektrodami. Pro reálný kondenzátor lze tedy navrhnout náhradní schéma, které je tvořeno rezistorem – ten představuje veškeré ztráty v kondenzátoru – a ideálním kapacitorem. Spojení těchto dvou součástí může být buď sériové, nebo paralelní. Každá možnost má své opodstatnění. U ideálního kondenzátoru by platilo, že proud předbíhá před napětím o  $\varphi=90^\circ$ , ovšem u reálného kondenzátoru je tento fázový posun vždy zmenšen o úhel  $\delta$ , přičemž platí, že  $\delta > 0^\circ$ . Tangens tohoto úhlu označuje ztráty v kondenzátoru a nazývá se ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$ .

Sériové náhradní schéma je vhodné pro kondenzátory, u nichž převažují ztráty na odporech přívodů a elektrod. Toto schéma a jeho fázorový diagram tedy vypadá následovně:



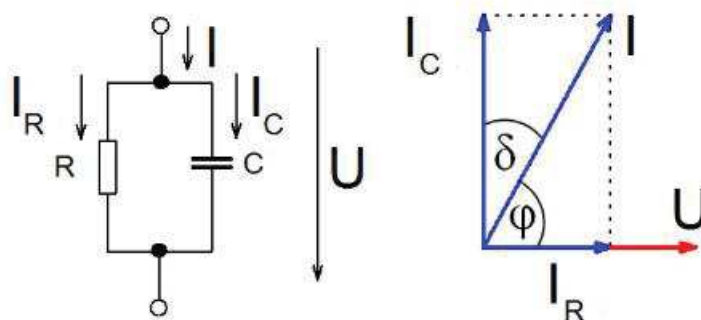
Obr. 3.5: Náhradní schéma a fázorový diagram pro sériové řazení součástek [36]

Z náhradního schématu plyne, že oběma součástkami protéká stejný proud  $I$ . Z fázorového diagramu lze vidět, že platí vztah:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I \cdot R}{I \cdot 2\pi f C} = 2\pi \cdot f \cdot R \cdot C \quad (3.9)$$

Je patrné, že se zvyšující se frekvencí se zvyšuje také ztrátový činitel. Je také důležité, aby odpor veškerých kontaktů, přívodů a elektrod byl co nejmenší.

Paralelní náhradní schéma se využívá u kondenzátorů, u kterých převažují dielektrické ztráty. Náhradní schéma a fázorový diagram pro toho zapojení je na Obr. 3.6.



Obr. 3.6: Náhradní schéma a fázorový diagram pro paralelní řazení součástek [36]

V tomto případě je na obou součástkách stejné napětí  $U$ . Platí tedy vzorec:

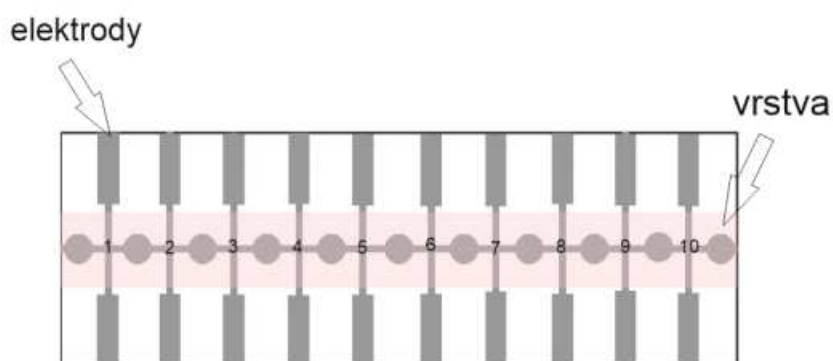
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R}}{\frac{U}{2\pi f C}} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot R \cdot C} \quad (3.10)$$

Ztráty zde se zvyšující se frekvencí klesají. Hodnoty odporů  $R$  v obou případech se liší o mnoho řádů, avšak na volbě náhradního schématu při výpočtu ztrátového činitele nezáleží.

# Kapitola 4

## Praktická část

V rámci praktické části bakalářské práce bylo vyrobeno 24 destiček s tenkovrstvými kondenzátory, přičemž na každé destičce bylo 10 kondenzátorů. Vzorky jsem vyrobil tak, že na substrát jsem nejprve nanесl první elektrodu ve formě hliníkové vrstvy pomocí napařování. Následně jsem napařováním nadeponoval vrstvu dielektrika, v našem případě korundu. V posledním kroku jsem napařil opět hliníkovou vrstvu, která plnila funkci druhé elektrody. Vyhotovený vzorek je zobrazen na Obr. 4.1, přičemž elektrody jsou znázorněny šedou barvou a vrstva dielektrika světle růžovou. Jednotlivé kondenzátory jsou na místě překrytí dvou elektrod, na obrázku očíslovány 1 až 10.



Obr. 4.1: Schéma vzorku s kondenzátory

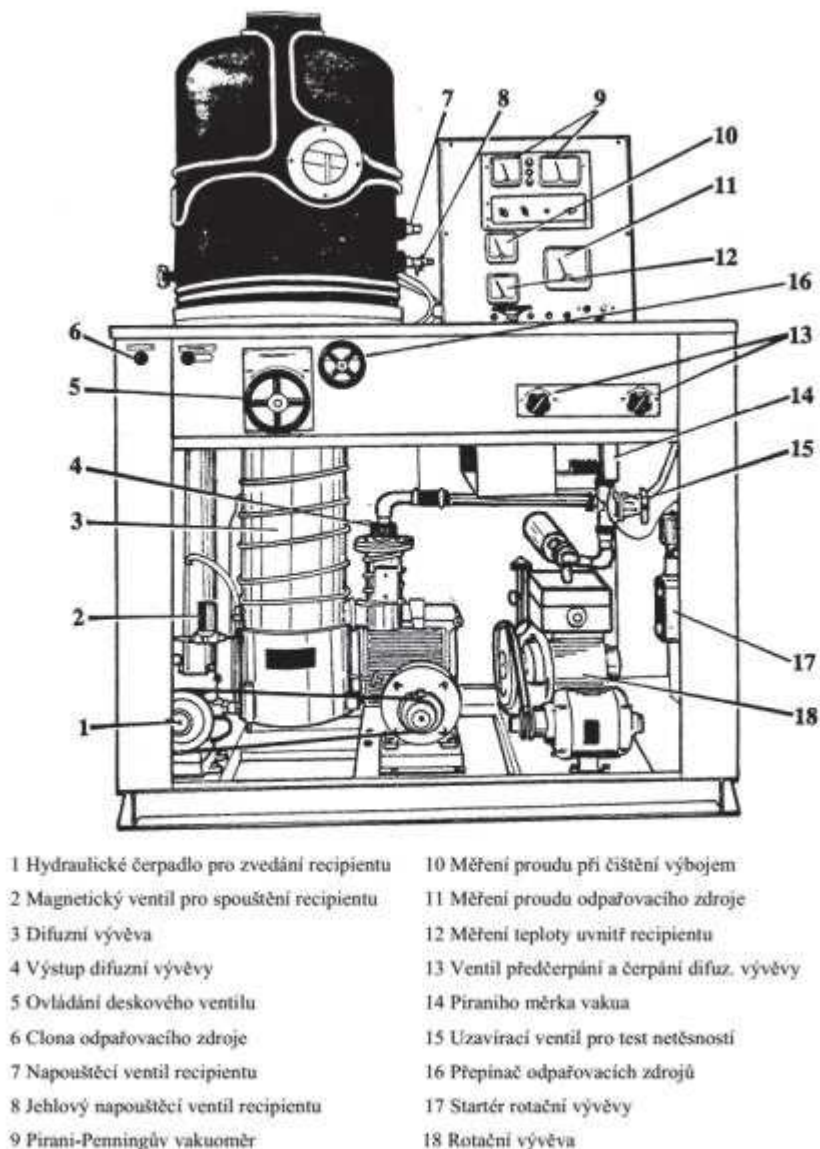
Vzorky byly vyráběny při kombinaci 3 různých časů a 3 různých výkonů při depozici dielektrické vrstvy. Každá kombinace času a výkonu byla vyrobena nejméně dvakrát, aby bylo možné ověřit, že naměřené vlastnosti nejsou dílem náhody, ale jsou skutečně závislé na zvolených podmínkách depozice. U každého vzorku jsem proměřil základní vlastnosti popsané v kapitole 3, konkrétně tloušťku a kapacitu.

### 4.1 Výrobní postup

V následujících odstavcích krátce popíši výrobu elektrod pomocí napařování a také výrobu dielektrické vrstvy napařováním. Přidám také obrázky obou zařízení a zmíním jejich další součásti jako například vývěvy. Před samotnou výrobou bylo nutné nejprve očistit substrát od prachových a jiných nečistot pomocí vzduchu z kompresoru. Každá nečistota by mohla fatálně ovlivnit adhezi tenké vrstvy a ovlivnit následné měření.

#### 4.1.1 Napařování elektrod

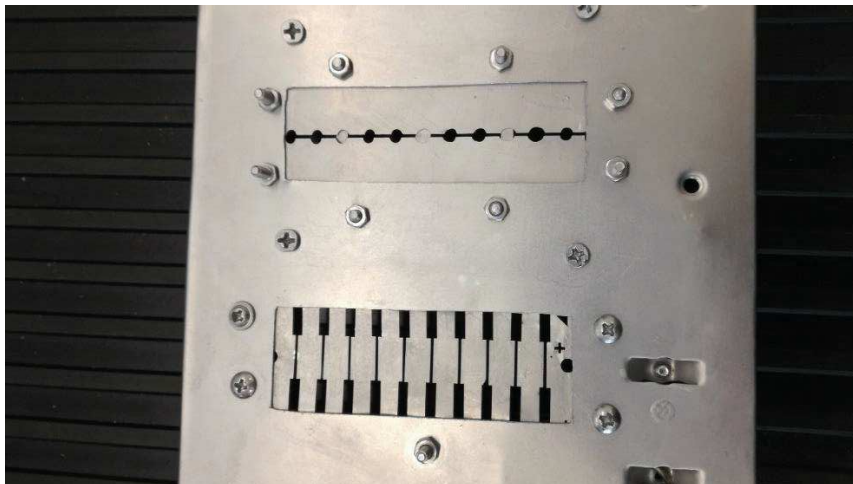
V tomto případě bylo využito napařování odporovým ohřevem popsané v kapitole 2.4.9. Pro výrobu jsem využil zařízení od firmy Edwards vyrobené v roce 1968. Jeho náčrt je na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Schéma a popis zařízení firmy Edwards pro napařování [27]

Nejprve jsem vložil substrát do vhodné masky, která zajistila, že se na něj nanesl požadovaný tvar vrstvy. Masky je na Obr. 4.3. Laboratorní maska umožňovala vložení 2 vzorků najednou. Následně jsem vložil materiál, který bylo nutno odpařit, do spirálky. Při výrobě těchto vzorků jsem použil hliníkový drát dlouhý 50 mm. Po umístění masky do držáku jsem recipient vakuově uzavřel a mohl přejít k vytvoření dostatečně hlubokého vakua. Na začátku bylo třeba vytvořit předvakuum pomocí rotační vývěvy, které se pohybovalo v řádu jednotek Pa, aby následně mohla efektivně pracovat difuzní vývěva. Pomocí této vývěvy jsem v recipientu dosáhl tlaku v řádu mPa, což je dostatečná hodnota pro kvalitní napařování. Nechal jsem spirálkou s hliníkovým drátem protékat elektrický proud a drátek se Jouleovým teplem odpařil. Odpařené

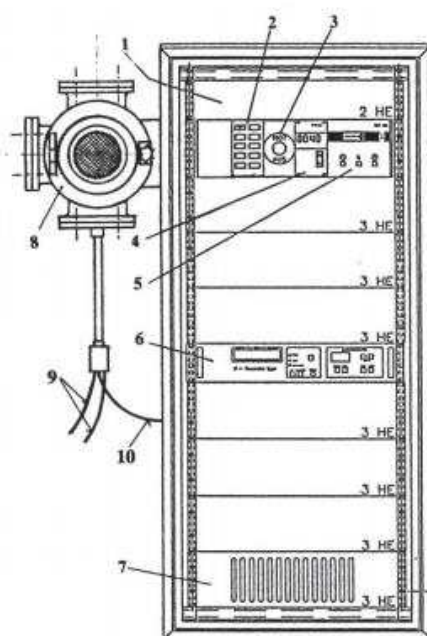
částice se nanesly na substrát umístěný přímo nad spirálku. Po odpaření veškerého hliníku ze spirálky jsem zaplnil recipient vzduchem, aby podtlak nebránil v jeho otevření a mohl jsem tedy vzorky vyjmout.



Obr. 4.3: Maska pro napařování

#### 4.1.2 Napařování dielektrika

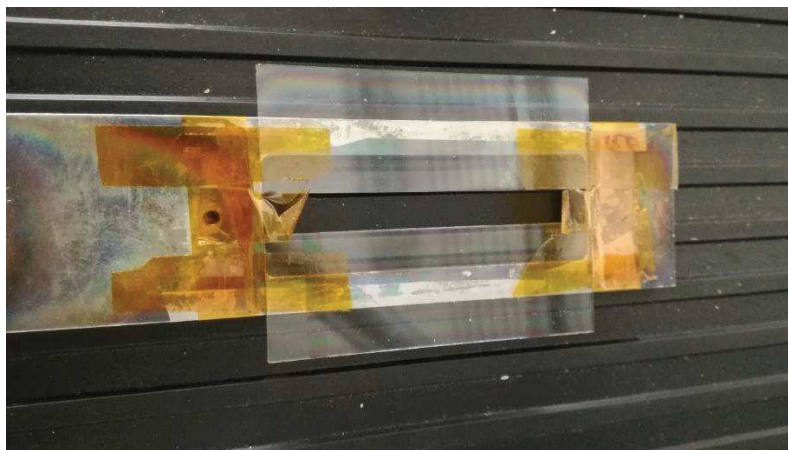
K tomuto úkolu bylo využito zařízení od firmy Balzers Pfeiffer. Konkrétní metodou, jíž jsem dielektrikum naprášil, bylo magnetronové napařování, které jsem popsal v kapitole 2.4.7. Toto zařízení je na Obr. 4.4 spolu s popisem jeho částí.



- |   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| 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. 4.4: Schéma a popis zařízení firmy Balzers Pfeiffer využité pro napařování [27]

Nejprve jsem pomocí lepící pásky připevnil substrát s napařenou elektrodou do masky, která zajistila, že se korundová vrstva naprášila pouze na tenký pás uprostřed substrátu. Tato maska je na Obr. 4.5. Po vložení do recipientu jsem započal čerpání membránovou vývěvou a následně turbóvývěvou, která zajistila v komoře tlak přibližně 3 mPa. Poté se recipient napustil pracovním plynem, v tomto případě argonem. Pomocí něj jsem udržoval po celou dobu depozice konstantní tlak v komoře 2 Pa. Jako další v pořadí jsem spustil generátor a nastavil určitý výkon, který se stejně jako tlak v recipientu udržoval konstantní po celou dobu výroby vzorku. Také bylo třeba udržovat minimální odražený výkon generátoru, neboť tento výkon by mohl zapříčinit znehodnocení naprášené vrstvy. Po dokončení depozice korundu jsem generátor vypnul a recipient napustil vzduchem, aby šel otevřít.



Obr. 4.5: Maska pro naprašování

## 4.2 Materiály použité pro výrobu

Při výběru materiálů bylo třeba zvážit několik faktorů. Nejdůležitější bylo, aby to byly materiály vhodné pro měření výše popsaných vlastností, ale bylo třeba zohlednit i ostatní parametry jako například cenu, dostupnost na trhu a podobně.

### 4.2.1 Substrát

Jako substrát jsem použil skleněnou destičku, která je snadno dostupná a levná. Mezi výhody skla jako substrátu patří jeho hladký povrch, který zajistí dostatečnou adhezi vrstvy, a také skutečnost, že je sklo průhledné. To umožní pozorovat nanesené vrstvy a odhalit tak pouhým pohledem případné nedokonalosti, které by byly jinak zjištěny až při měření kompletně dokončeného vzorku. Sklo však může být často prohnuté, což při měření znesnadní, případně zcela znemožní měření tloušťky vrstvy, která je na něm nanesená. Toto je hlavní nevýhoda použití skla.

### 4.2.2 Elektrody

Jak bylo popsáno v úvodu kapitoly 4, jako materiál pro elektrody kondenzátorů jsem zvolil hliník. Podobně jako u skla jde o materiál levný a velmi snadno dostupný. Vzhledem k využití napařování odporovým ohřevem je důležitou výhodou hliníku skutečnost, že ho lze odpařovat z wolframových spirálek (teplota tání wolframu je až několiknásobně vyšší než teplota tání hliníku). Jeho nevýhodou je poněkud nízká přilnavost, ovšem v rámci této bakalářské



práce nebude tato skutečnost testována a zatěžována a zmíněná nevýhoda zde tedy není důležitá.

### 4.2.3 Dielektrikum

Jako dielektrikum pro kondenzátory byl použit korund. Oxid hlinitý, jak zní jiný název tohoto materiálu, dosahoval vysoké čistoty a jeho relativní permitivita byla přibližně 10. Korund byl umístěn v terči, ze kterého byly jeho částice při naprašování vyraženy. Nanesená korundová vrstva je zcela průhledná, na skleněné destičce ji tedy nebylo možné pouhým okem pozorovat.

### 4.2.4 Pracovní plyn

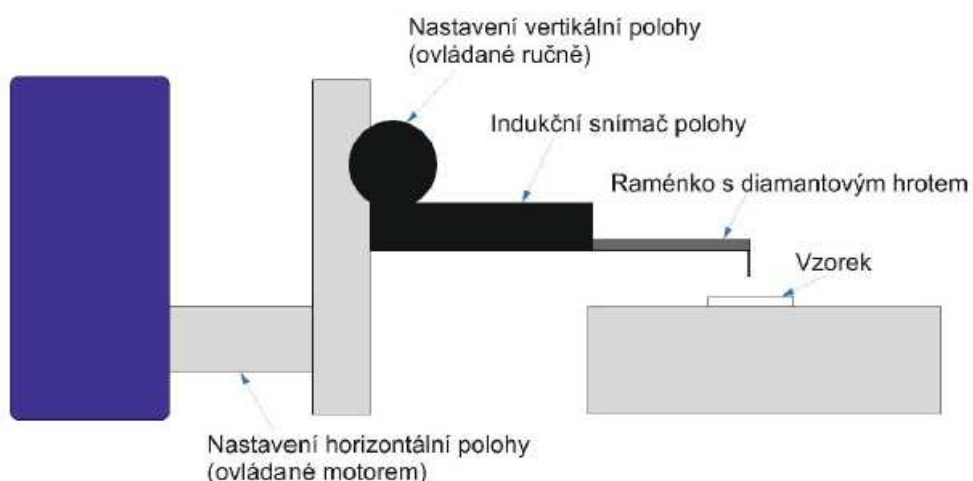
Při naprašování bylo zapotřebí využít plynu, který umožní kvalitní nanesení dielektrické vrstvy. Pro tento úkol jsem zvolil argon, což je plyn bez chuti, barvy a zápachu. Je nehořlavý, nejedovatý a především zvýší kvalitu depozice vrstvy.

## 4.3 Měření vlastností

Hlavním smyslem této práce bylo proměřit změny daných vlastností vyrobených kondenzátorů v závislosti na parametrech depozice vrstvy dielektrika a posoudit, zda jsou tyto změny v souladu s teoretickými předpoklady.

### 4.3.1 Měření tloušťky

Měření tloušťky experimentálně vyrobených vzorků bylo provedeno pomocí přístroje Talystep. Ten odesílal data do programu TalyProfile Gold, ve kterém jsem výsledky vyhodnotil. Vzhledem ke konstrukci měřicího zařízení schematicky znázorněného na Obr. 4.6 lze společně s tloušťkou tenké vrstvy možné měřit i drsnost jejího povrchu.

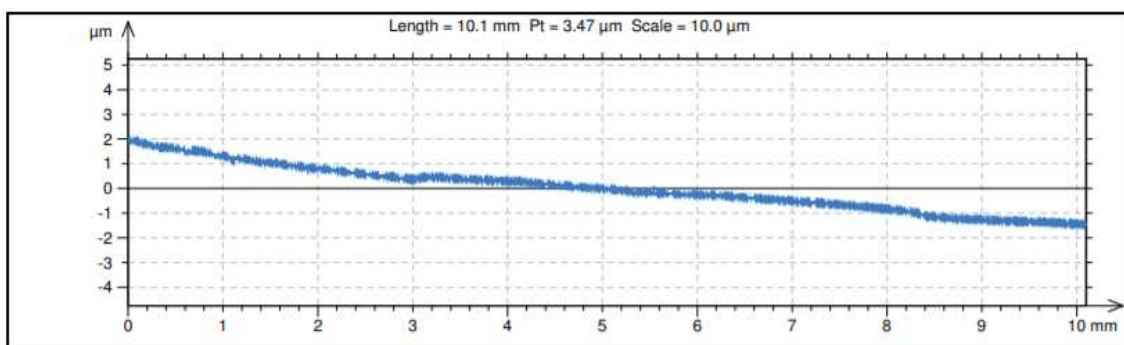


Obr. 4.6: Schéma měřicího přístroje Talystep [3]

Princip měření spočívá v posouvání velmi citlivého hrotu po povrchu vzorku. Měření začíná tam, kde ještě není nanesena vrstva, aby mohl být zaznamenán „skok“ po najetí hrotu na nanesenou tenkou vrstvu. Tím, že hrot kopíruje povrch vzorku, je celý proces ohrožen především nerovnostmi na substrátu. Pokud by byla měřena téměř dokonale rovnoměrně nanesená vrstva, avšak na nekvalitním substrátu s poměrně drsným povrchem, výsledek měření bude

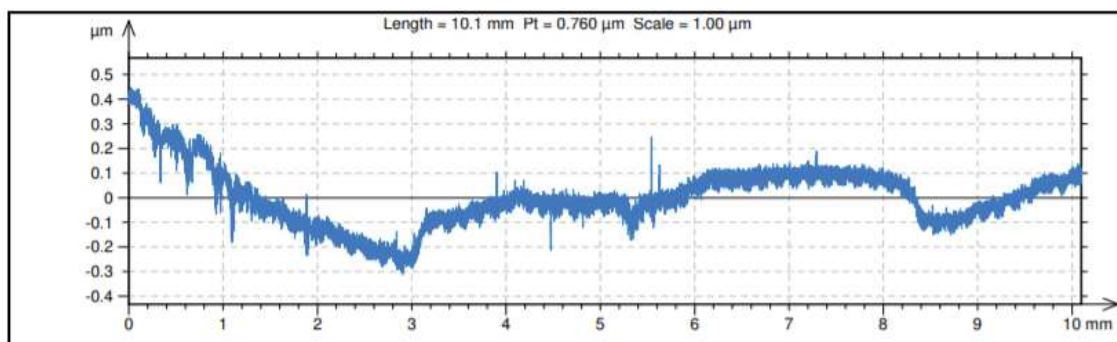
neuspokojivý. Při použití méně kvalitních substrátů je tedy přesnější zvolit jinou metodu, například výpočet tloušťky z kapacity (podrobněji rozebráno v odstavci 3.3.2) a porovnat naměřené výsledky s vypočtenými.

Aby bylo možné z měření získat jasné informace, je třeba prvotně naměřená data postupně upravovat v počítači v programu TalyProfile Gold. Na následujících obrázcích je vysvětlen princip úprav dat, která jsem naměřil na vzorku vyrobeném speciálně pro zaškolení k práci na tomto stanovišti. Na Obr. 4.7 je naměřený profil tenké vrstvy, který jsem obdržel z měřicího zařízení. Lze si povšimnout, že z tohoto obrázku nelze vyčíst jakékoliv důležité informace.



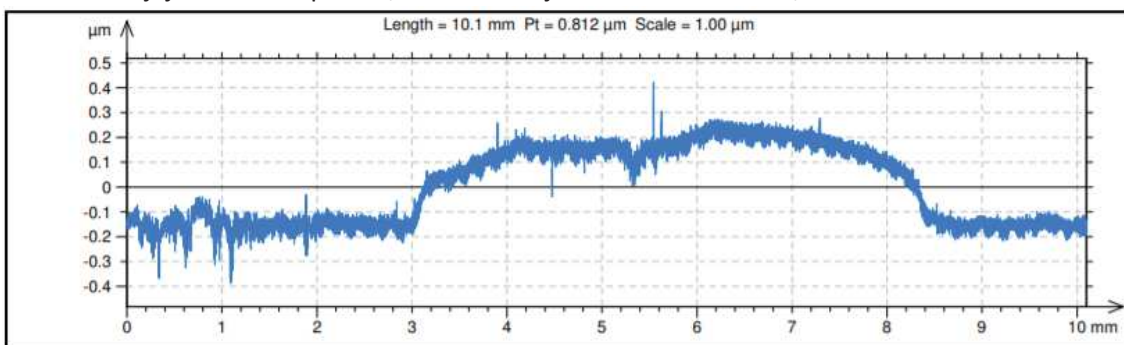
Obr. 4.7: Naměřený profil tenké vrstvy

Profil je skloněný pod určitým úhlem, pro lepší přehlednost ho lze tedy v programu vyrovnat:



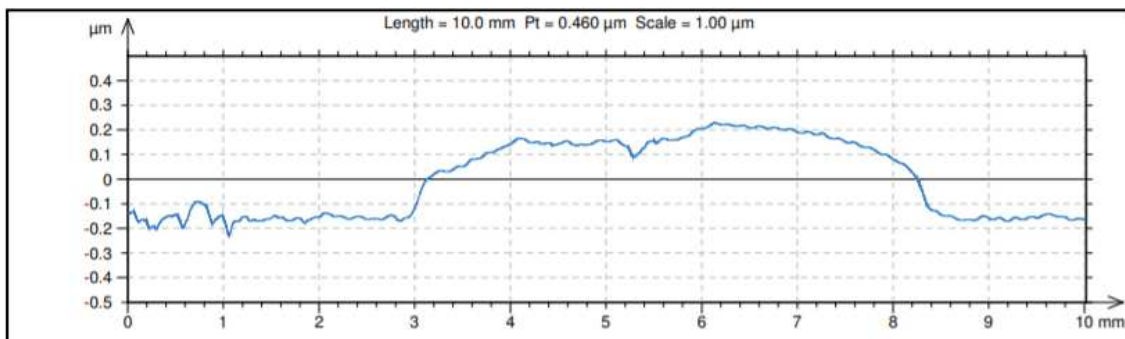
Obr. 4.8: Vyrovnaný profil tenké vrstvy

Na obou koncích profilu jsou značné nerovnosti, které negativně ovlivňují měření i vizuální přehlednost. Tyto nerovnosti jsou vzhledem k velké citlivosti měřicího přístroje dány především otřesy. Případně může mít vliv také horší kvalita nanesené vrstvy u krajů, neboť depozice probíhá nejkvalitněji uprostřed substrátu, jelikož ten je umístěn vždy kolmo nad terčem. Nerovnosti lze vzhledem k jejich vhodné poloze, a to na okrajích měřeného úseku, oříznout:



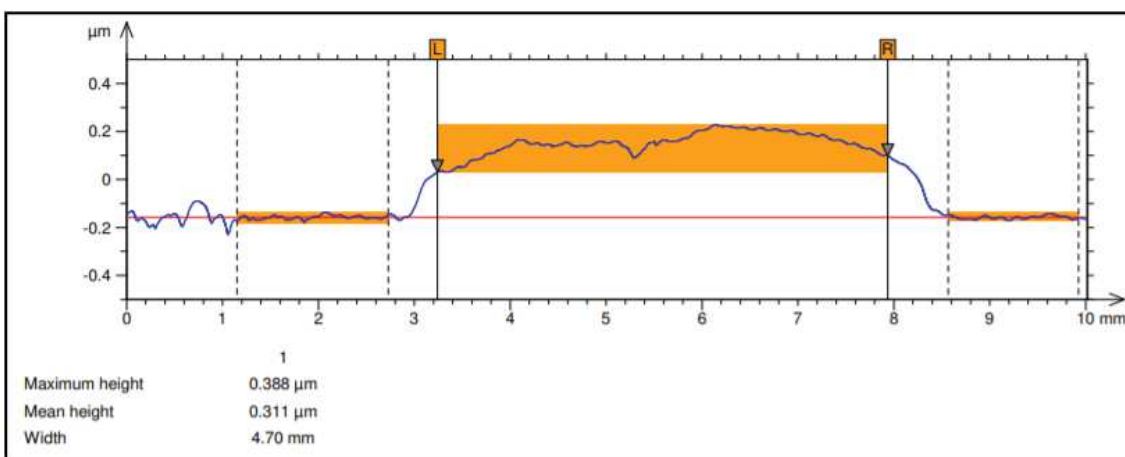
Obr. 4.9: Oříznutý profil tenké vrstvy

Na obr. 4.9 už lze jasně rozeznat nanesenou tenkou vrstvu. Je zde však patrný jistý šum, který by mohl ovlivnit přesnost měření. Měřící stanoviště je umístěno na pracovním stole, k vzniku samotného šumu tedy může dojít pouhou chůzí osoby v místnosti, kde dochází k měření. Celý průběh lze vyfiltrovat a šumu se tak zbavit:



Obr. 4.10: Vyfiltrovaný profil tenké vrstvy

Tento průběh už je dostatečně kvalitní na to, aby mohl být podroben přesnému měření. To jsem provedl zvolením dvou referenčních hladin, jejichž šířky lze ručně upravovat. Tím se vyhnou viditelným nerovnostem uprostřed měřeného úseku, které jsem nemohl oříznout a které by značně ovlivnily přesnost měření:



Obr. 4.11: Měření tloušťky tenké vrstvy

Z takto upraveného výstupu už jsem byl schopen získat kýžené informace s dostatečnou přesností. Program sám vypíše informace jako maximální tloušťka, průměrná tloušťka a šířka měřené vrstvy.

### 4.3.2 Měření kapacity

Toto měření probíhalo na přístroji TESLA BM 595 RLCG METER. Kapacita je pouze jedním z několika parametrů, které tento přístroj dokáže měřit. Pro tento případ bylo třeba zvolit měřící napětí, které přístroj přiložením kontaktů na elektrody přivede na kondenzátor a na základě kterého dopočítá kapacitu tohoto kondenzátoru. Vzhledem k velmi malé tloušťce dielektrika, a tedy malému průraznému napětí, bylo použito nejnižší možné napětí 50 mV. Při použití vyššího napětí by hrozil elektrický průraz dielektrika, a tudíž zničení kondenzátoru.

## 4.4 Podmínky při výrobě kondenzátorů

Při výrobě kondenzátorů jsem pracoval se třemi hodnotami výkonů generátoru a třemi časy depozice. V následující tabulce jsou přehledně seřazeny příslušné kombinace těchto dvou parametrů spolu s přiřazením těchto kombinací k číslu konkrétního vyrobeného vzorku. Tlak pracovního plynu byl u všech vzorků totožný a to 2 Pa, proto v tabulce není zahrnut. U některých vzorků bylo při měření zjištěno, že jejich vlastnosti jsou naprosto nesmyslné a při výrobním postupu nejspíše došlo k zásadním chybám jako například velké kolísání tlaku v recipientu nebo výkonu generátoru, případně byl příliš velký odražený výkon, který bylo třeba regulovat. Proto tyto vzorky byly označeny x.3 a vyřazeny z vyhodnocování.

Tab. 4.1: Podmínky při výrobě jednotlivých vzorků

Číslo vzorku	Výkon generátoru při depozici dielektrika [W]	Čas depozice dielektrika [min]
1.1, 1.2, 1.3	80	10
2.1, 2.2, 2.3	100	10
3.1, 3.2	120	10
4.1, 4.2, 4.3	80	20
5.1, 5.2	100	20
6.1, 6.2	120	20
7.1, 7.2, 7.3	80	30
8.1, 8.2, 8.3	100	30
9.1, 9.2, 9.3	120	30

## 4.5 Vyhodnocení měření

Na výsledky měření je možné se podívat z několika úhlů pohledu. Nejprve se budu věnovat měření kapacity. Každou destičku s kondenzátory jsem přeměřil ihned po výrobě, neboť kondenzátory s velmi tenkou vrstvou dielektrika, by mohly být časem znehodnoceny, případně zcela zničeny. Tento předpoklad se potvrdil, když jsem chtěl po dvou týdnech provést kontrolní měření a kondenzátory, které byly vyrobeny při nízkém výkonu i čase, tedy obsahovaly velmi tenkou vrstvu dielektrika, nebylo možné proměřit. To je dáno nejspíše tím, že elektrická pevnost těchto vzorků byla poměrně malá vzhledem k jejich tloušťce.

### 4.5.1 Měření kapacity

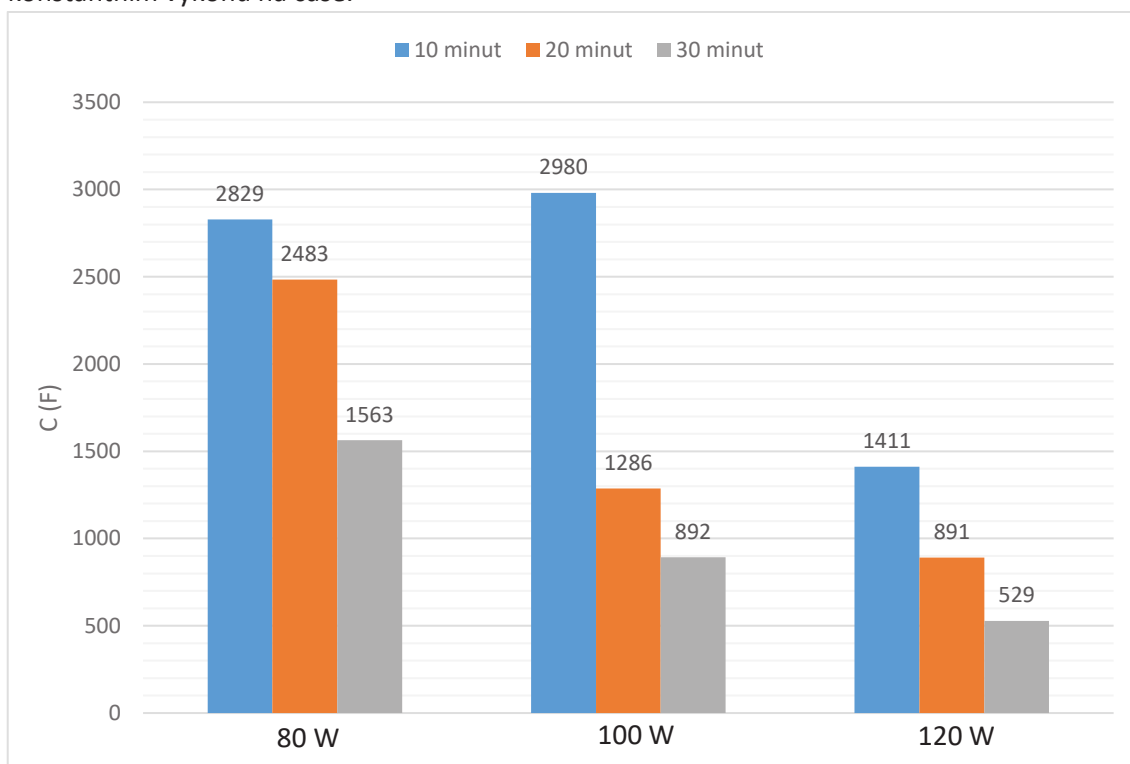
Pro každou kombinaci výkonu a času byly proměřeny 2 vzorky. Z obou naměřených hodnot kapacit byl vypočten aritmetický průměr a pokud byla odchylka naměřených hodnot od tohoto průměru menší než 20 %, bylo s tímto průměrem dále pracováno. Pokud byla odchylka větší než 20 %, byl vyroben nový vzorek, jenž nahradil ten vzorek, který z ostatních vzorků svojí kapacitou nejvíce vybočoval, a byl znovu spočítán aritmetický průměr kapacit. Pro přehlednější zpracování měnicích se vlastností při změnách podmínek depozice byly tyto průměrné hodnoty kapacit 10 kondenzátorů na jedné destičce znovu zprůměrovány. Tento aritmetický průměr vyjadřoval průměrnou kapacitu na jedné destičce. Vzhledem k tomu, že kondenzátory 1 a 10 měly často kvůli jejich krajní poloze více či méně vybočující hodnoty kapacit, které by negativně ovlivnily celkový aritmetický průměr jedné destičky, vyřadil jsem je z tohoto průměrování a aritmetický průměr jsem spočítal pouze z průměrných hodnot

kondenzátorů 2 až 9. Nejprve se zaměřím na změnu kapacity při konstantním výkonu a měním se čase.

Tab. 4.2: Naměřené hodnoty kapacit C kondenzátorů pro 3 výkony a 3 časy depozice

<b>80 W</b>			
Poloha na destičce	10 minut (vzorek 1)	20 minut (vzorek 4)	30 minut (vzorek 7)
	C [pF]	C [pF]	C [pF]
1	4645	3706	2500
2	3371	2810	1815
3	2635	2225	1400
4	2423	2252	1449
5	2177	2048	1293
6	2436	2275	1450
7	2825	2588	1610
8	3166	2679	1607
9	3572	2988	1881
10	4517	3825	2440
Průměr kondenzátorů 2-9	<b>2829</b>	<b>2483</b>	<b>1563</b>
<b>100 W</b>			
Poloha na destičce	10 minut (vzorek 2)	20 minut (vzorek 5)	30 minut (vzorek 8)
	C [pF]	C [pF]	C [pF]
1	4316	2135	1444
2	3554	1543	997
3	2852	1253	832
4	2604	951	786
5	2139	997	685
6	2512	1065	749
7	3021	1291	884
8	3406	1490	1026
9	3757	1698	1177
10	4438	2076	1525
Průměr kondenzátorů 2-9	<b>2980</b>	<b>1286</b>	<b>892</b>
<b>120 W</b>			
Poloha na destičce	10 minut (vzorek 3)	20 minut (vzorek 6)	30 minut (vzorek 9)
	C [pF]	C [pF]	C [pF]
1	2412	1589	946
2	1777	1124	670
3	1350	883	520
4	1162	754	463
5	955	640	380
6	1095	646	342
7	1357	810	514
8	1646	996	618
9	1947	1275	722
10	2496	1485	936
Průměr kondenzátorů 2-9	<b>1411</b>	<b>891</b>	<b>529</b>

Z dat v Tab. 4.2 jsem sestrojil graf, v kterém jsou znázorněny závislosti kapacit při konstantním výkonu na čase.



Obr. 4.12: Graf závislosti průměrné kapacity C jedné destičky při konstantních výkonech generátoru na čase depozice.

Z grafu na Obr. 4.12 lze vidět, že každá trojice dat splňuje teoretické předpoklady. To znamená, že se zvyšujícím se časem depozice klesá kapacita kondenzátorů. To je dáno skutečností, že čím delší je depozice vrstvy, tím je dielektrikum tlustší a vzhledem k tomu, že kapacita kondenzátoru je nepřímo úměrná tloušťce dielektrika v něm, pak kapacita těchto kondenzátorů se zvyšujícím se časem depozice klesá.

V následující tabulce jsou zaneseny informace, jak se pro jednotlivé výkony mění kapacita s časem:

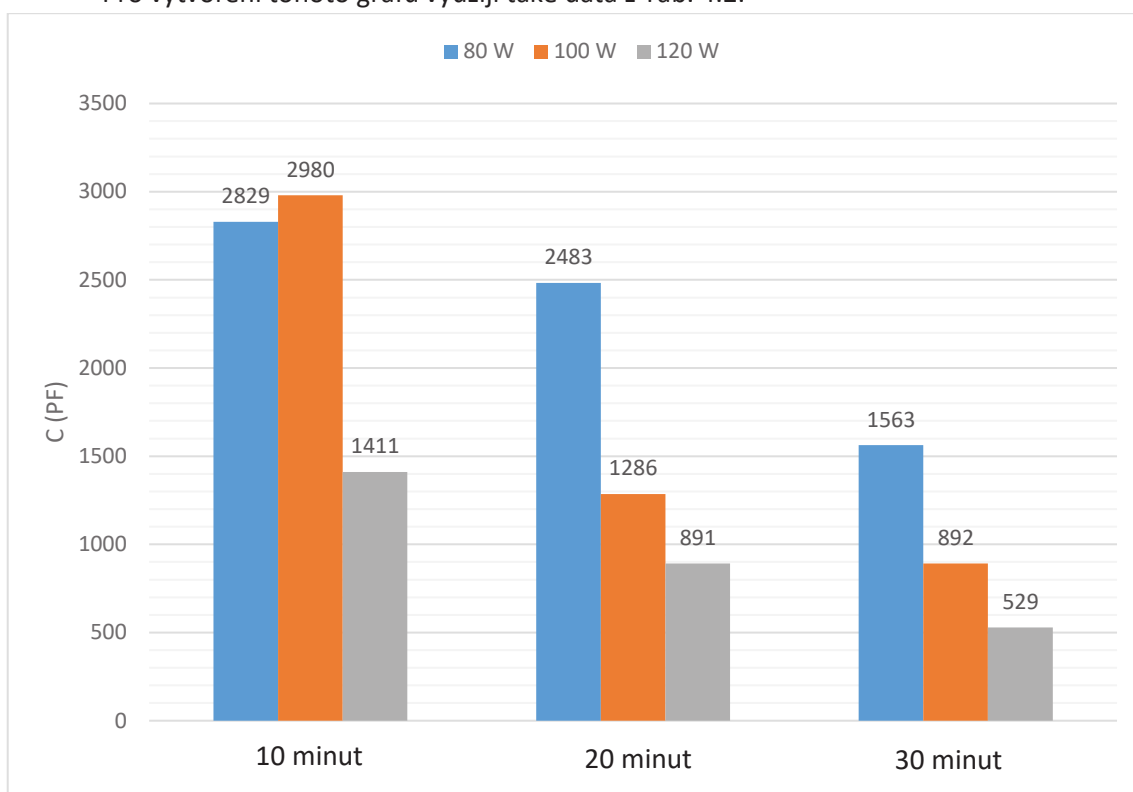
Tab. 4.3: Změna kapacity  $\Delta C$  kondenzátorů se vzrůstajícím časem depozice

	C [pF]			$\Delta C_{10-20}$		$\Delta C_{20-30}$	
	10 minut	20 minut	30 minut	[pF/min]	[%/min]	[pF/min]	[%/min]
80 W	2829	2483	1563	-34,6	-1,2	-92,0	-3,7
100 W	2980	1286	892	<b>-169,4</b>	<b>-5,7</b>	-39,4	-3,1
120 W	1411	891	529	-52,0	-3,7	-36,2	-4,1
	<b>Průměr <math>\Delta C</math> [pF/min]</b>			<b>-70,6 (s chybou), -50,8 (bez chyby)</b>			
	<b>Průměr <math>\Delta C</math> [%/min]</b>			<b>-3,6 (s chybou), -3,2 (bez chyby)</b>			

Kondenzátory vyrobené při výkonu 100 W a času 10 minut vykazují nezvykle vysoké hodnoty kapacit. To je způsobeno nejspíš nepřesnostmi při výrobě a chybou měření. Proto úbytek kapacity počítaný z této hodnoty se značně liší od ostatních hodnot (téměř dvojnásobný úbytek oproti druhému největšímu úbytku) a výsledný aritmetický průměr byl vypočítán jak s touto chybou hodnotou (v tabulce zvýrazněna červenou barvou), tak i bez této hodnoty. Právě tento výsledek je tedy směrodatnější.

Podobně, jako jsem na stránkách výše rozebral změnu kapacity při konstantním výkonu a měnícím se času, na následujících stránkách analyzuji změnu kapacity při konstantním času a měnícím se výkonu.

Pro vytvoření tohoto grafu využiji také data z Tab. 4.2.



Obr. 4.13: Graf závislosti průměrné kapacity  $C$  jedné destičky při konstantních časech depozice na výkonu generátoru.

Z grafu na Obr. 4.13 vyplývá, že v případě první trojice dat pro čas depozice 10 minut nebyl splněn teoretický předpoklad, neboť kapacita destičky vyráběné 10 minut při výkonu 80 W je nižší (a tedy tloušťka vrstvy dielektrika vyšší) než destičky vyráběné 10 minut při výkonu 100 W. Podle teorie by mělo platit, že čím vyšší výkon při depozici zvolíme, tím více atomů se na substrát nanese, a tedy tím tlustší by měla být nadeponovaná vrstva. Tato chyba je nejspíše způsobená tím, že vrstvy vyráběné nejkratší dobu jsou nejnáchylnější na chyby. Pokud během procesu výroby dojde k významnému zakolísání tlaku nebo odraženého výkonu, není už dostatek času na to, aby byla vrstva opravena. Pokud by se podobné zakolísání objevilo v prvních deseti minutách třicetiminutového výrobního procesu, je zde na opravu času dostatek.

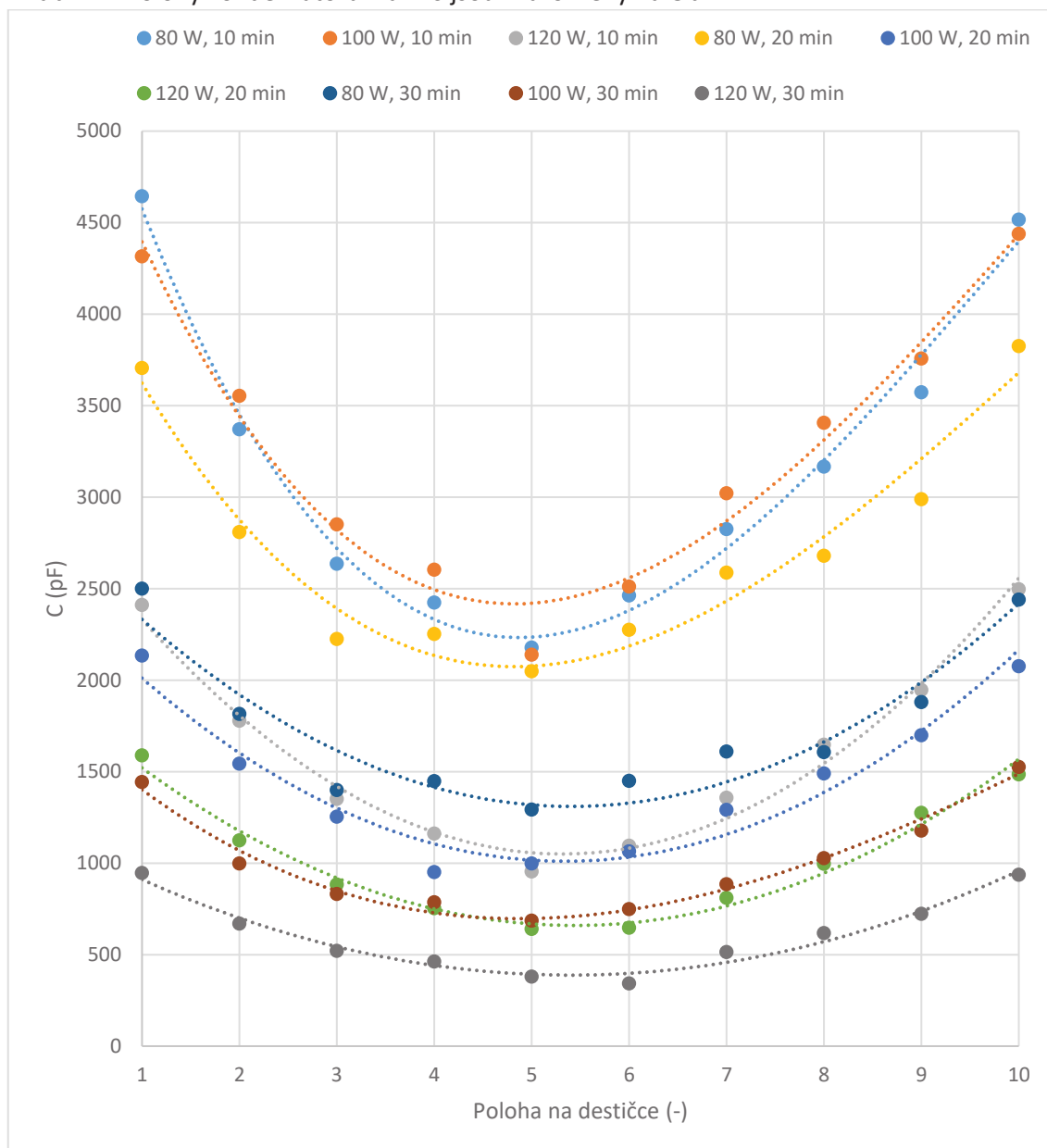
Stejně jako u zkoumání závislosti na čase je zde na místě vypočítat, jak se kapacita mění se vzrůstajícím výkonem.

Tab. 4.4: Změna kapacity  $\Delta C$  kondenzátorů se vzrůstajícím výkonem generátoru

	C [pF]			$\Delta C_{80-100}$		$\Delta C_{100-120}$	
	80 W	100 W	120 W	[pF/W]	[%/W]	[pF/W]	[%/W]
10 minut	2829	2980	1411	7,6	0,3	-78,5	-2,6
20 minut	2483	1286	891	-59,9	-2,4	-19,8	-1,5
30 minut	1563	892	529	-33,6	-2,1	-18,2	-2,0
	<b>Průměr <math>\Delta C</math> [pF/W]</b>			<b>-33,7 (s chybou), -42,0 (bez chyby)</b>			
	<b>Průměr <math>\Delta C</math> [%/W]</b>			<b>-1,7 (s chybou), -2,1 (bez chyby)</b>			

Problémová destička vyráběná 10 minut při výkonu 100 W zde způsobila větší chybu než při výpočtech v Tab. 4.3, neboť zde jsem se dostal až do kladných čísel. Pokud však chybná data zanedbám, procentuální úbytek kapacity u ostatních vzorků je podobný.

Do této chvíle jsem porovnával jednotlivé destičky mezi sebou. Nyní je třeba se podívat na vlastnosti jednotlivých kondenzátorů v rámci jedné destičky, u nichž jsou také očekávány určité změny ve vlastnostech dle teoretických předpokladů. Na následujícím grafu jsou zobrazeny kapacity kondenzátorů v závislosti na poloze na destičce. Data pro tento graf jsou také z Tab. 4.2. Polohy kondenzátorů 1 až 10 jsou znázorněny na Obr. 4.1.



Obr. 4.14: Graf závislosti kapacity C jednotlivých kondenzátorů na poloze na destičce. Proloženo polynomy 2. a 4. stupně

Pro lepší vizuální přehlednost a lepší vyčtení informací z grafu jsem proložil naměřené body polynomy 2., nebo 4. stupně. Z grafu na Obr. 4.14 je možné vyčíst a potvrdit fakta, která byla zobrazena na grafech výše pomocí průměru daných hodnot kapacit C. Tedy že s rostoucím časem depozice a rostoucím výkonem generátoru klesá kapacita kondenzátorů, samozřejmě až



na již zmíněnou výjimku u vzorku číslo 2. Z tohoto grafu je také nově patrné, že je potvrzen teoretický předpoklad pro chování kapacity v rámci jedné destičky, podle kterého má být uprostřed destičky nejtlustší vrstva dielektrika, neboť při depozici se prostředek substrátu nachází přímo nad zdrojem atomů. Ve směru k oběma krajům pak vrstva slábne a kapacita tedy roste. Tento předpoklad je potvrzen u všech zkoumaných vzorků. Zajímavá je skutečnost, že s rostoucím časem depozice a výkonem generátoru jsou křivky čím dál plošší. Zatímco u nejméně prohnuté křivky vzorku 1 (80 W, 10 minut) je rozdíl v kapacitě mezi prostředním kondenzátorem a kondenzátory krajními 2468 pF, respektive 2340 pF, u nejplošší křivky pro vzorek 9 (120 W, 30 minut) je tento rozdíl roven pouze 604 pF, respektive 594 pF. V absolutních číslech se zdá, že se zvyšujícím se časem a výkonem depozice dochází k lepšímu rozložení tenké vrstvy na substrátu. Avšak pokud tyto absolutní hodnoty převedu do procentuálních změn v rámci jedné destičky, potom je rozdíl mezi prostředním kondenzátorem a kondenzátory krajními pro vzorek 1 roven 54,3 %, respektive 51,8 % a pro vzorek 9 pak 63,9 %, respektive 61,7 %.

#### 4.5.2 Měření tloušťky

Postup měření tloušťky byl popsán v kapitole 4.3.1. Bohužel už při prvních pokusech o naměření tloušťky vrstvy dielektrika bylo zřejmé, že skleněné destičky použité jako substráty mají velmi prohnutý profil. Tyto skleněné destičky jsou široké 25 mm a při kontrolním měření jejich profilu jsem zjistil, že rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším místem na těchto 25 mm je až 90  $\mu\text{m}$ . To se může zprvu jevit jako zanedbatelná hodnota, ovšem vzhledem ke skutečnosti, že vrstvy, které bylo třeba proměřit, mají tloušťku v řádu desítek nanometrů, je tato hodnota zcela zásadní a velice znesnadnila, u mnoha vzorků dokonce zcela znemožnila, přesné měření. Pro příklad, zkušební tenká vrstva, zobrazená na Obr. 4.7, měla tloušťku přes 300  $\mu\text{m}$ .

Abych měření tloušťky maximálně usnadnil, část masky pro výrobu jedné elektrody jsem na 3 místech přelepil lepicí páskou, aby se na daném místě vyskytovala pouze vrstva korundu nepřekrytá hliníkem. Tyto 3 místa jsou vidět na Obr. 4.3 na pravé masce. Také jsem ihned po vytvoření dielektrické vrstvy na krajích substrátu fixem označil hranice nanesené vrstvy (korund je zcela průhledný a pouhým okem je tedy nemožné rozpoznat hranice tenké vrstvy). To mi umožňovalo zkoumat citlivým hrotem TalyStepu pouze několik málo milimetrů destičky, kde jsem hledal počátek korundové vrstvy.

Celkem jsem uskutečnil měření na přibližně 80 místech, některé vzorky byly ovšem tak prohnuté, že nemělo smysl dále se snažit získat z některých naměřených průběhů věrohodné informace. V programu TalyProfile Gold jsem provedl přes 400 úprav s cílem maximálně upravit naměřený průběh takovým způsobem, aby mohla být odečtena věrohodná hodnota tloušťky. V neprospěch hrála také skutečnost, že se vzorky bylo manipulováno nejen při upnutí do masek a vyjmutí z nich, ale zejména při měření kapacity, které předcházelo měření tloušťky. Při této manipulaci mohlo na určitých místech na destičce dojít k porušení či znehodnocení tenké vrstvy a pokud jsem měřil zrovna toto místo, nemohl jsem dostat smysluplný výsledek. Tuto chybu jsem se snažil eliminovat proměřením každého měřicího místa z více úhlů. I přes všechny tyto skutečnosti jsem se přibližně u poloviny vzorků nedostal k žádnému rozumnému výsledku.

Tloušťku jsem také spočítal z naměřených kapacit. Tento způsob získání tloušťky tenké vrstvy je vzhledem k okolnostem mnohem přesnější. Tloušťka byla vypočtena pomocí vztahu (3.8), jenž byl odvozen v kapitole 3.3.2. Vzorec vypadá následovně:

$$d = \frac{\epsilon \cdot S}{C}$$

Plocha každého kondenzátoru je obdélníkového tvaru, bylo tedy možné pomocí mikroskopu změřit obě strany tohoto obdélníku a spočítat tak obsah plochy kondenzátoru  $S$ . Jelikož se tyto rozměry v rámci destičky mírně lišily, byl každý rozměr změřen pětkrát na různých místech. Tyto hodnoty poté byly zprůměrovány. Kratší strana obdélníku  $m$  měla délku 0,70 mm (její rozměr se na destičce lišil maximálně o 0,03 mm), delší strana  $n$  měla délku 0,81 mm (tento rozměr se lišil nejvíce o 0,06 mm). Obsah plochy kondenzátoru jsem tedy vypočítal jako:

$$S = m \cdot n = 0,70 \cdot 0,81 = 0,567 \text{ mm}^2$$

Relativní permitivita korundu byla stanovena na  $\epsilon_r = 10$ . [37] Permitivita vakua je rovna  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ . Permitivita korundu je tedy  $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-11}$

Příklad výpočtu tloušťky  $d$  z kapacity  $C$  pro kondenzátor v poloze 1 vzorku 1:

$$d = \frac{\epsilon \cdot S}{C} = \frac{8,854 \cdot 10^{-11} \cdot 0,567 \cdot 10^{-6}}{4645 \cdot 10^{-12}} = 1,0807 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 10,81 \text{ nm}$$

V následující tabulce jsou zaznamenány jak vypočtené, tak změřené tloušťky vrstev korundu. Na každém vzorku bylo pomocí lepicí pásky vytvořeno měřící místo vždy mezi druhým a třetím (místo K), pátým a šestým (místo L) a sedmým a osmým (místo M) kondenzátorem. Tloušťky vypočtené v těchto kondenzátorech jsem tedy vždy v dané dvojici zprůměroval, abych vypočítal přibližnou tloušťku dielektrické vrstvy přesně mezi nimi. Z každé dvojice vzorků se v každém místě (kromě místa L na vzorku 8 a místa M na vzorku 9) podařilo tloušťku změřit alespoň na jednom vzorku z této dvojice.

Tab. 4.5: Naměřené a vypočtené tloušťky  $d$  dielektrické vrstvy

	d [nm]					
	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená	Vypočtená	Naměřená
	Vzorek 1 (80 W, 10 min)		Vzorek 4 (80 W, 20 min)		Vzorek 7 (80 W, 30 min)	
Místo K	17,0	62,8	20,2	63,3	31,8	80,8
Místo L	21,7	72,6	23,3	57,3	36,7	86,5
Místo M	15,0	42,3	17,8	34,4	29,0	83,9
	Vzorek 2 (100 W, 10 min)		Vzorek 5 (100 W, 20 min)		Vzorek 8 (100 W, 30 min)	
Místo K	15,9	27,1	36,3	25,4	55,3	57,2
Místo L	21,7	74,7	48,7	52,1	70,1	-
Místo M	14,1	35,9	31,6	43,2	45,8	48,2
	Vzorek 3 (120 W, 10 min)		Vzorek 6 (120 W, 20 min)		Vzorek 9 (120 W, 30 min)	
Místo K	32,7	48,1	50,8	51,8	85,8	115,0
Místo L	49,2	75,5	78,1	74,1	139,5	179,0
Místo M	28,1	43,8	44,9	45,1	75,4	-

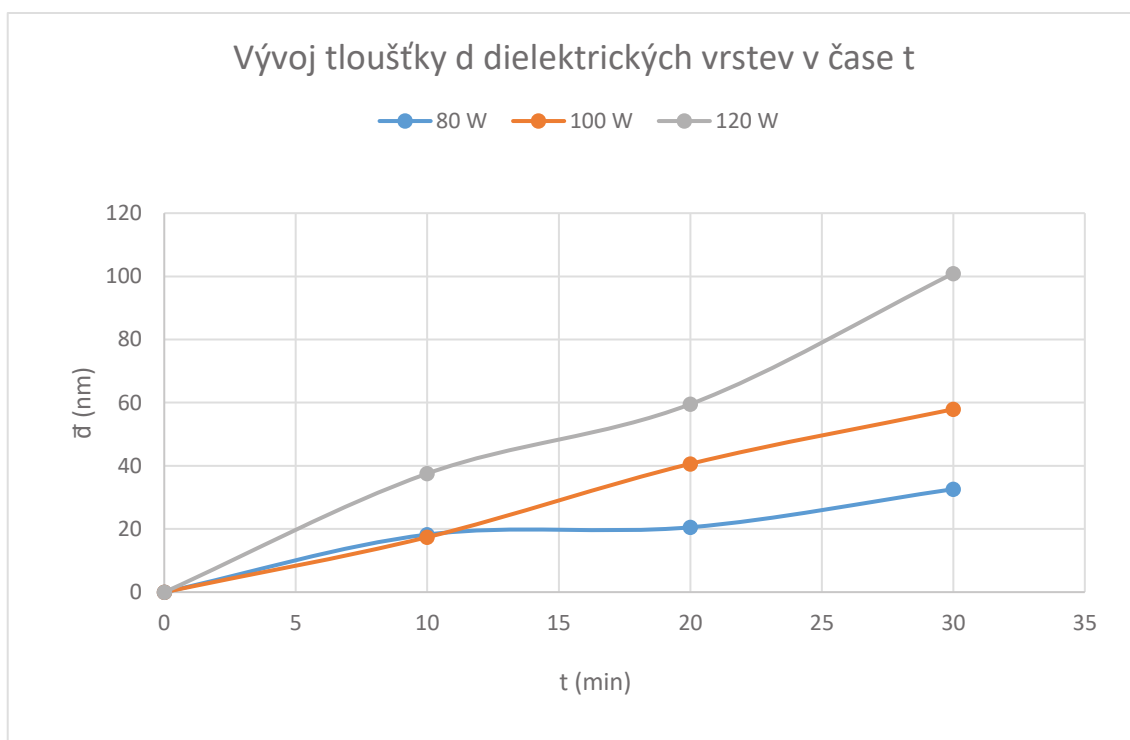
Jak lze vidět z tabulky, některé naměřené údaje jsou oproti těm vypočteným čtyřikrát větší, jiné jsou s nimi téměř totožné. Vzhledem k velkému množství úprav a zanedbání jednotlivých nerovností je však otázka, jakou mají hodnoty naměřené pomocí TalyStepu vypovídající hodnotu. I přes všechna opatření, která měla zajistit co nejpřesnější měření, je bohužel možné, že naměřené hodnoty jsou nepřesné. Jednoznačně větší vypovídající hodnotu v tomto případě mají hodnoty vypočtené z kapacity, jelikož právě měření kapacity je mnohem přesnější.

V následující tabulce jsou zaneseny průměrné tloušťky dielektrické vrstvy každého vzorku. Podobně jako v případě průměrných hodnoty kapacit byl tento aritmetický průměr vypočítán z tlouštěk dielektrické vrstvy kondenzátorů 2 až 9.

Tab. 4.6: Aritmetický průměr tlouštěk dielektrické vrstvy na jednotlivých vzorcích

	$\bar{d}$ [nm]		
	10 minut	20 minut	30 minut
80 W	<b>18,2</b> (vzorek 1)	<b>20,5</b> (vzorek 4)	<b>32,6</b> (vzorek 7)
100 W	<b>17,4</b> (vzorek 2)	<b>40,6</b> (vzorek 5)	<b>57,9</b> (vzorek 8)
120 W	<b>37,5</b> (vzorek 3)	<b>59,5</b> (vzorek 6)	<b>100,9</b> (vzorek 9)

Na základě těchto dat zanesených do grafu lze přibližně vidět, jakým způsobem dielektrická vrstva rostla v čase v při různých výkonech.



Obr. 4.15: Graf závislosti průměrné tloušťky  $\bar{d}$  na čase pro výkony 80 W, 100 W a 120 W.

Tento graf velmi přesně zobrazuje již předem popsanou skutečnost, tedy že vrstva vytvářená 10 minut při výkonu 80 W by měla být tenčí a naopak vrstva vytvářená 10 minut při výkonu 100 W by měla být podstatně tlustší. Kvůli chybě způsobené těmito 2 vzorky se v grafu objevují skutečnosti v rozporu s teoretickými předpoklady. Za prvé, vrstva naprašovaná výkonem 100 W je v intervalu od 0 do 10 minut tenčí, než vrstva naprašovaná výkonem 80 W. Za druhé, vrstva vytvářená výkonem 80 W v časovém intervalu od 10 do 20 minut má konstantní tloušťku. Toto samozřejmě platit nemůže, neboť s přibývajícím časem vrstva narůstá při jakémkoliv výkonu. Nebýt těchto dvou chybných hodnot, závislosti na grafu by nejspíš téměř přesně splňovaly teoretické předpoklady, tedy že růst vrstvy v čase je tím rychlejší, čím je výkon generátoru větší.

# Kapitola 5

## Ekonomické zhodnocení technologií

V rámci tohoto úkolu bylo v plánu porovnat nejprve naprašování a napařování v laboratorních podmínkách v laboratoři FEL ČVUT, kde jsem vyrobil a proměřil tenkovrstvé kondenzátory pro bakalářskou práci. Pro tento výpočet jsem využil inventurní seznam katedry, ze kterého bylo možné zjistit cenu veškerých zařízení, která jsem při výrobě využil, spolu s rokem pořízení. Ten je důležitý vzhledem k přepočítání kupních cen všech zařízení na dnešní ceny, aby mohly být technologie porovnány. Jako další bod měly být vypočteny měrné výrobní náklady s anuitou i pro průmyslová zařízení a následně porovnány technologie v laboratoři a v průmyslu. Například ověřit, zda je závislost ceny na kapacitě výroby lineární nebo potvrdit či vyvrátit teoretický předpoklad, že zařízení pro průmysl, které vyrobí za daný časový úsek desetkrát více součástek než zařízení pro laboratoř, nebude mít desetkrát vyšší pořizovací cenu. Abych mohl splnit tento úkol, kontaktoval jsem několik firem v Evropě, Spojených státech Amerických, Japonsku nebo Austrálii (například AVX, EPCOS, KEMET, Nichicon, Panasonic, TDK, Vicor, Vishay, WIMA, Xicon a další) s žádostí, zda by mi nezaslali informace o jejich konkrétních zařízeních. Kromě společností, které tyto zařízení využívají pro výrobu, jsem kontaktoval také společnosti, které tato zařízení vyrábějí. Bohužel žádná z firem mé žádosti nevyhověla, neboť tyto informace si střeží jako obchodní tajemství. Vzhledem k této skutečnosti bude součástí kapitoly 5 pouze porovnání měrných výrobních nákladů provozu fakultních zařízení spolu s teoretickým úvodem k důležitým termínům využitých při výpočtech.

### 5.1 Kalkulace nákladů

Kalkulace nákladů je činnost, která vede ke zjištění nákladů na určitý výkon. Tento výkon se označuje jako kalkulační jednice, což může být výrobek či služba. Kalkulační jednice je vždy vymezena měrnou jednotkou, na kterou se náklady vztahují. V tomto případě bude kalkulační jednicí jeden kus tenké vrstvy, která byla vyrobena naprašováním nebo napařováním v laboratoři FEL ČVUT. Ve výpočtech budu brát v úvahu pouze přímé náklady na výrobu, tedy přímý materiál (substrát, materiál, z kterého vzniká tenká vrstva), přímé mzdy pracovníků, kteří obsluhují zařízení a ostatní přímé náklady (spotřeba elektrické energie, chladicí vody, pracovního plynu a také sociální a zdravotní pojištění pracovníků). Kromě těchto přímých nákladů je třeba také do nákladů zahrnout a rozpočítat pořizovací investice zařízení, neboť ceny těchto zařízení se mohou značně lišit, a tedy významně ovlivnit celkové náklady na jeden výrobek. Nepřímé náklady jako výrobní, správní, zásobovací a odbytová režie nebudou ve výpočtech zahrnuty. [38]

Zde kalkulovaný 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. Vzhledem k malé míře automatizace je třeba dbát na vyšší kvalifikaci pracovníků, neboť tito pracovníci zodpovídají za celý průběh výrobního procesu. Vyšší kvalifikace znamená vyšší platové ohodnocení těchto lidí. Výhodou kusové výroby je menší investice do

zařízení, která nejsou zpravidla tak složitá a tudíž drahá, jako složitější zařízení a linky pro automatizovanou výrobu. Nevýhodou je skutečnost, že vzhledem k malým objemům výroby není možné využívat množstevní slevy při nákupu materiálů. Protipólem kusové výroby je plně automatizovaná sériová výroba. V tomto případě většinu zodpovědnosti za výrobní proces přebírají naprogramované stroje a linky, jejich obsluze tedy postačí nižší kvalifikace. Automatizovaná sériová výroba je typická pro velké podniky, které zaměstnávají větší množství pracovníků a vlastní velké skladovací prostory.

Samotnou kalkulaci nákladů je možné provádět několika různými metodami. Tyto metody jsou různě složité a hodí se k využití pouze v některých případech. Nejdůležitější metody, které budou dále rozebrány, jsou kalkulace dělením a kalkulace přírážková. Podle toho, s jakými informacemi se při výpočtu pracuje, se dělí kalkulace na předběžné a výsledné. Předběžná kalkulace se sestavuje před zahájením výroby, při výpočtu se vychází z technickohospodářské normy. Výsledná kalkulace se sestavuje po skončení výroby a podkladem jsou již údaje, které byly zjištěny přímo při výrobě. [38,39]

### 5.1.1 Kalkulace dělením

Základní prostá kalkulace dělením je nejjednodušší metoda, která ale není v praxi v průmyslových podnicích často využívána, neboť je možné ji využít pouze u výrobních procesů, které produkují jediný druh výrobku, tedy například cihelny. Náklady na kalkulační jednici  $J$  se vypočítají vydělením celkových nákladů  $TC$  celkovým množstvím výrobků  $Z$ :

$$J = \frac{TC}{Z} \quad (5.1)$$

Pokud podnik vyrábí více modifikací jednoho výrobku, které se vzájemně liší pouze velikostí, tvarem, hmotností nebo pracností (například různě velké cihly ze stejného materiálu), využívá se mírně upravená kalkulace dělením. Ta se nazývá kalkulace dělením s poměrovými čísly a je založena na následujícím principu. Ze všech modifikací výrobků je zvolen jeden představitel těchto výrobků, pomocí kterého vyjádříme ostatní výrobky. Vztahy mezi tímto představitelem a ostatními výrobky jsou stanoveny poměrovými čísly. Ty vyjadřují poměr mezi náklady na jednicové druhy výrobků. Objem výroby je následně přepočítán na počet jednic zvoleného představitele a celkové náklady jsou vyděleny přepočteným objemem výroby. Z tohoto výpočtu se získají náklady na kalkulační jednici představitele a náklady ostatních výrobků se dopočítají zpětným vynásobením nákladů představitele poměrovými čísly. [39]

### 5.1.2 Kalkulace přírážková

Tato metoda je podstatně využívanější, neboť je možné její pomocí vypočítat náklady při výrobě různorodých výrobků. Přímé náklady se na kalkulační jednici spočítají přímo, nepřímé náklady se rozvrhnou k jednotlivým jednicím jako přírážka k přímým nákladům. Nepřímé náklady se rozvrhují pomocí zvolené základny, který může být buď peněžní, nebo naturální. V peněžní základně figurují přímé náklady (mzdy, materiál) a režijní přírážka v procentech z této základny, v případě naturální základny se jedná o normohodiny nebo strojové hodiny a režijní sazba se uvádí v korunách na danou jednotku rozvrhované základny. Právě volba vhodné základny, jež musí být dostatečně stálá, snadno zjistitelná a musí tvořit podstatný podíl ve struktuře nákladů, představuje základní nevýhodu této metody kalkulace. Správní režie většinou nemá žádnou souvislost s výší přímých nákladů a její alokace pomocí zvolené základny je zcela nahodilá. Takto nastavená kalkulace poté vede k zprůměrování nepřímých nákladů daných produkty. V praxi pak dochází k tomu, že tento typ kalkulace nadhodnocuje náklady

standardních velkosériových výkonů, které se podniku tedy jeví jako málo ziskové, a naopak podhodnocuje náklady speciálních malosériových výkonů i přesto, že skutečnost může být v mnoha případech zcela opačná. [39,40]

## 5.2 Náklady na výrobu

Jak bylo naznačeno v úvodu kapitoly 5, ve výpočtech budou zahrnuty pouze přímé náklady. Do kalkulace započítám přímé odpisy zařízení, náklady na elektřinu, výrobní materiál, pracovní plyn a mzdy se sociálním a zdravotním pojištěním. Náklady na opravy zařízení, ztráty ze zmetků a vadných výrobků spolu s daní z příjmu nebudou uvažovány.

### 5.2.1 Odpisy

Odpisy slouží k vyjádření procesu postupného snižování hodnoty zařízení. Výše odpisu vyjadřuje míru opotřebenosti odpisovaného zařízení. V praxi se využívá lineární a nelineární metoda odpisování. V tomto případě využiji metodu lineární, tedy každý rok bude odepsáno stejné procento z pořizovací ceny zařízení. Odpisy figurují v kalkulaci jako náklad, o který je možné snížit základ pro výpočet daně z příjmu. [38] Při výpočtech částky, která se bude odepisovat, vystupuje celá řada problémů. Prvním z nich je volba doby životnosti zařízení, které se bude odepisovat. Dále je také potřeba vzít v úvahu skutečnost, že cena peněz se časem mění a je tedy třeba zvolit určitou diskontní míru. Aby bylo možné porovnat zařízení pro naprašování a napařování, je také nutné vzhledem k jejich různým datům pořízení přepočítat pořizovací ceny na ceny dnešní. Doby životnosti i diskontní míru využiji při výpočtu anuity.

### 5.2.2 Doba životnosti zařízení

Obě porovnávaná zařízení 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. V tomto výpočtu zvolím jako dobu životnosti  $T_z = 8$  let.

### 5.2.3 Diskontní míra

Diskontní míra, kterou budu v pozdějších výpočtech označovat písmenem  $r$ , je roční sazba vyjadřující činitele času, což je faktor ovlivňující rozdíl mezi současnou a budoucí hodnotou určité veličiny – v tomto případě ceny zařízení. [38] Podobně jako doba životnosti je diskontní míra závislá na hospodářském cyklu. Obecně se diskont volí podle výnosnosti podniku, ovšem v tomto výpočtu žádný podnik neuvažuji, a proto zvolím diskontní míru  $r = 0,08$ , tedy 8 %. Diskont se při zhoršující se ekonomické situaci volí, na rozdíl od doby životnosti zařízení, menší. Tedy v při konjunkturu je diskontní sazba 10 %, při depresi 6 % a při krizi 4 %.

### 5.2.4 Anuita

Jelikož jsem v předešlých kapitolách definoval jak diskontní míru, tak dobu životnosti zařízení, mohu pokročit k výpočtu anuity. Pro výpočet využiji následující vzorec:

$$A = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \quad (5.2)$$

kde  $A$  je anuita,  $T_z$  je doba životnosti zařízení a  $r$  je diskont. Jelikož u obou porovnávaných zařízení pracují se stejnou dobou životnosti i diskontní mírou, bude anuita také stejná. Dosazením veličin do vzorce (5.2) získám výslednou anuitu:

$$A = \frac{(1+r)^{T_z} \cdot r}{(1+r)^{T_z} - 1} = \frac{(1+0,08)^8 \cdot 0,08}{(1+0,08)^8 - 1} = 0,174$$

Cenu používání daného zařízení za 1 rok zjistím tak, že vynásobím výše vypočtenou anuitu  $A$  s pořizovací cenou zařízení. Abych toto mohl udělat, musím nejprve dopočítat onu pořizovací cenu.

### 5.2.5 Pořizovací cena v dnešních penězích

V této části budou přepočítány ceny zařízení pro výrobu tenkých vrstev i veškerého příslušenství k nim k roku 2019. Zařízení byla zakoupena v rozmezí i několika desítek let, a tudíž by bylo zcela nelogické porovnávat původní částky, neboť inflace českou korunu během tohoto období radikálně znehodnotila. Inflace se uvádí v procentech a reprezentuje všeobecný vzestup celkové cenové hladiny. Opak inflace se nazývá deflace a vyjadřuje pokles celkové cenové hladiny. Míru inflace pravidelně zveřejňuje Český statistický úřad, avšak až od roku 1989. Jelikož byly některé komponenty zde porovnávaných zařízení zakoupeny už v 70. letech 19. století, je třeba odhadnout míru inflace do roku 1989. V té době byla oficiálně vykazována inflace průměrně 1,3 % p.a., ovšem v této hodnotě není započtena skrytá inflace, která nepochybně existovala. Tu ekonomové z Vídně odhadli na průměrně 2,0 % p.a., což je hodnota, kterou je třeba sečíst s oficiálně vykazovanou hodnotou. Výsledná průměrná hodnota inflace v době před rokem 1991 je tedy 3,3 % p.a. [46] Míra inflace od roku 1989 je v Tab. 5.1.

Tab. 5.1: Průměrné hodnoty míry inflace z let 1989 až 2018 [41,42]

Rok [-]	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Míra inflace i [% p.a.]	1,4	9,7	56,6	11,1	20,8	10,0	9,1	8,8	8,5
Rok [-]	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Míra inflace i [% p.a.]	10,7	2,1	3,9	4,7	1,8	0,1	2,8	1,9	2,5
Rok [-]	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Míra inflace i [% p.a.]	2,8	6,3	1,0	1,5	1,9	3,3	1,4	0,4	0,3
Rok [-]	2016	2017	2018						
Míra inflace i [% p.a.]	0,7	2,5	2,1						
<b>Průměrná inflace 1989–2018 [% p.a.]</b>				<b>6,4</b>					

Se znalostí pořizovacích cen zařízení spolu s rokem jejich zakoupení (tyto informace jsem získal s pomocí vedoucí bakalářské práce z inventurního seznamu katedry) a inflací v daném období lze spočítat, kolik by tato zařízení stála v cenách k 01.01.2019 a tyto ceny pak lze porovnat. Přepočty na aktuální ceny pro všechny komponenty napařovacího i napařovacího zařízení jsou v následujících tabulkách:

Tab. 5.2: Přepočet na aktuální ceny pro komponenty naprašovacího zařízení

Napařování			
Objekt [-]	Rok pořízení $t_p$ [-]	Pořizovací cena $K_t$ [CZK]	Aktuální cena $K_a$ [CZK]
Napařovací zařízení Balzers Pfeiffer	1995	1 490 495	3 003 570
Kompresor	2006	10 612	13 466
Dávkovací vakuový systém	2004	51 700	68 522
Plovákový průtokoměr	2002	5 995	8 176
<b>Celková cena k 01.01.2019</b>			<b>3 093 734</b>

Tab. 5.3: Přepočet na aktuální ceny pro komponenty napařovacího zařízení

Napařování			
Objekt [-]	Rok pořízení $t_p$ [-]	Pořizovací cena $K_t$ [CZK]	Aktuální cena $K_a$ [CZK]
Napařovací zařízení Edwars	1968	199 183	2 155 761
Redukční ventil	2018	12 483	12 483
<b>Celková cena k 01.01.2019</b>			<b>2 168 244</b>

Výpočet aktuální ceny byl uskutečněn pomocí následujícího vzorce:

$$K_a = K_t \cdot (1 + i_{t+1}) \cdot (1 + i_{t+2}) \cdot \dots \cdot (1 + i_{2018}) \quad (5.3)$$

kde  $K_a$  je aktuální cena k 01.01.2019,  $K_t$  je původní pořizovací cena v roce  $t_p$  a  $i_x$  je procentuální míra inflace v roce  $x$  vydělená 100.

### 5.2.6 Výpočet odepisované částky s anuitou

Nyní už znám hodnotu anuity pro zvolený diskont a dobu životnosti, kterou jsem spočítal v kapitole 5.2.4 i přepočítané ceny veškerých komponent pro napařovací i napařovací zařízení z kapitoly 5.2.5. Mohu tak spočítat částky, které se budou z celkové ceny zařízení odepisovat každý rok. Jelikož uvažuji odepisování lineární, budou tyto částky konstantní a vypočítám je pomocí vzorce:

$$O = A \cdot K_a \quad (5.4)$$

kde  $O$  je částka odepisovaná každý rok,  $A$  je anuita a  $K_a$  celková cena zařízení. Částku  $O$  následně vydělím počtem výrobků vyrobených na daném zařízení během jednoho roku provozu, abych získal tento náklad na jeden výrobek.

### 5.2.7 Náklady na mzdy, sociální a zdravotní pojištění

Při výpočtech v této kapitole vezmu v úvahu skutečný stav laboratoře. Jelikož se jedná pouze o obsluhu dvou zařízení, přičemž nejvíce času při výrobě zabírá čerpání recipientu kvůli dosažení dostatečně vysokého vakua, bude k provozu obou zařízení postačovat 1 zaměstnanec. Obě zařízení jsou uzpůsobena čistě pro laboratorní výrobu a v obou zařízeních lze tedy v každém



časovém okamžiku vyrábět pouze 1 vzorek. V následující tabulce je seznam úkonů, které je potřeba učinit k vytvoření tenké vrstvy, spolu s jejich časovou náročností.

Tab. 5.4: Jednotlivé úkony při tvorbě tenkých vrstev a jejich časová náročnost.

	Přípravná fáze [min]	Čerpání předvakua [min]	Čerpání vakua [min]	Depozice tenké vrstvy [min]	Zavzdušnění recipientu [min]	Konečná fáze [min]	<b>Celkem</b> [min]
Napařování	7	8	13	4	3	5	<b>40</b>
Naprašování	7	15	15	20	5	5	<b>67</b>

Masky používané pro napařování i naprašování jsou velmi podobné, přípravná a konečná fáze, do které spadá očištění substrátu, jeho upnutí do masky a vyjmutí z ní, vložení masky do recipientu a po depozici její následné vyjmutí, jsou časově stejně náročné pro obě technologie. Při čerpání recipientu se u napařovacího zařízení využívá rotační vývěvy k získání předvakua a následně difúzní vývěvy pro konečné vakuum, v případě naprašování se využívá membránové vývěvy v kombinaci s turbovývěvou. Největší rozdíl v časové náročnosti lze vidět v samotné depozici tenké vrstvy. U napařování tento proces spočívá v odpaření materiálu vysokou teplotou, což zabere v průměru pouze 4 minuty. Naopak u naprašování dochází k vyražení atomů z terče. Délka tohoto procesu je závislá na požadavku na tloušťku tenké vrstvy. Při vytváření vzorků pro tuto práci byly použity intervaly 10, 20 a 30 minut. Jelikož se předpokládá stejné množství od každého intervalu, lze uvažovat průměrnou hodnotu, tedy rovných 20 minut.

Během pracovní doby, jež má 8 hodin, dokáže pracovník dle dat v Tab. 5.4 vyrobit 12 vzorků napařováním a 7,1 vzorků naprašováním (po zaokrouhlení tedy 7 vzorků). Výrobou 12 napařených vzorků pracovník stráví stejný čas jako výrobou 7 vzorků naprášených, polovina jeho mzdy bude tedy rozdělena mezi napařené vzorky a druhá polovina mzdy pak mezi vzorky naprášené.

Dle dat Českého statistického úřadu činila v Praze ve 4. čtvrtletí roku 2018 průměrná hrubá měsíční mzda 41 851 Kč. [43] Do nákladů na zaměstnance je třeba započítat také odvody sociálního (25 % hrubé mzdy) a zdravotního (9 % hrubé mzdy) pojištění. Tzv. superhrubá mzda, která bude celkovým nákladem na zaměstnance, je oproti hrubé mzdě o 34 % vyšší a je tedy rovna 56 080 Kč. Z této částky budu dále vycházet. Pro další výpočty budu pracovat s rokem, který má 252 pracovních dnů. Každý měsíc má tudíž průměrně 21 pracovních dnů, tedy denní superhrubý plat zaměstnance bude po zaokrouhlení 2 670 Kč. Náklad ve formě mezd je 1335 Kč na napařené vzorky a 1335 Kč na naprášené vzorky, tedy 111,3 Kč na jeden napařený vzorek a 190,7 na jeden naprášený vzorek. Za rok provozu se vyrobí 3 024 napařených vrstev a 1 764 naprášených vrstev.

### 5.2.8 Náklady na materiál

Při napařování jsou nanášené částice získávány odpařením hliníkového drátku o průměru 1 mm a délce 50 mm. Čistota hliníku je až 99,999 % a cena jednoho klubka tohoto drátu o celkové délce 100 m je 222 €, tedy 5 717 Kč (při kurzu 25,75 ze dne 02.01.2019 [44]). Jedno klubko tohoto drátu postačí na výrobu 2 000 tenkých vrstev. Náklady na materiál na vyrobení jedné tenké vrstvy jsou tedy 2,90 Kč.

Naprašovací zařízení využívá získávání atomů ze speciálního terče, který je vyroben z vysoce čistého korundu. Cena tohoto terče je 450 € (11 588 Kč) a jeden terč vystačí pro výrobu přibližně 1000 tenkých vrstev. Náklady na výrobu jedné naprášené vrstvy jsou tedy 11,60 Kč.

V této části se také objeví náklady na substrát. Jako substrát jsem používal speciální skleněné destičky o rozměrech 76x26 mm. Ty se kupují v balení po 50 kusech, jehož cena je 11,30 € (291 Kč). Náklady na 1 destičku tedy činí 5,80 Kč. Tento náklad je třeba přičíst k nákladům na nanášený materiál, pro napařování je výsledná suma rovna 8,70 Kč a pro naprašování 17,40 Kč.

### 5.2.9 Náklady na elektřinu

Pro výpočet nákladů na elektřinu budu laboratoř považovat jako izolovaný objekt s vlastní spotřebou energie. Do nákladů nezapočítám spotřebu osvětlení, klimatizace, topení a podobně, neboť se věnuji pouze přímým nákladům a tyto položky spadají spíše do režie. Ve výpočtech zohledním pouze spotřebu výrobních zařízení přímo ve výrobě.

Tab. 5.5: Spotřeba elektrické energie všech komponentů pro naprašování

Napařování			
Objekt [-]	Příkon P [kW]	Doba využití [hod/rok]	Spotřeba elektrické energie za rok [kWh]
Vysokofrekvenční generátor	0,30	588	176,4
Magnetron	0,50	588	294,0
Turbovývěva	0,50	441	220,5
Membránová vývěva	0,14	441	61,7
<b>Celková roční spotřeba energie [kWh]</b>			<b>752,6</b>

Tab. 5.6: Spotřeba elektrické energie všech komponentů pro napařování

Napařování			
Objekt [-]	Příkon P [W]	Doba využití za rok [hod]	Spotřeba elektrické energie za rok [kWh]
Difúzní vývěva	2,25	655	1473,8
Rotační vývěva	1,10	404	444,4
<b>Celková roční spotřeba energie [kWh]</b>			<b>1918,2</b>

Vzhledem k tomu, že zařízení pro napařování je téměř o 30 let starší, jsou příkony jeho zařízení podstatně větší.

Pomocí kalkulačky Energetického regulačního úřadu [45] jsem zjistil nejvýhodnějšího dodavatele elektrické energie, kterým je společnost Fonergy, s.r.o., konkrétně produkt STANDARD Klasik 24. Pro přidělení tohoto produktu není třeba splnit speciální podmínky. V laboratoři postačí jistič 3 x 16 A. V platbě za silovou elektřinu figuruje fixní poplatek (24,20 Kč/měsíc) a cena samotné elektřiny (1802,90 Kč/MWh). Do celkové ceny za zajišťování distribuce elektřiny patří stálá platba za jistič (32,70 Kč/měsíc) a platba za elektřinu (3780,60 Kč/MWh). Ostatní náklady tvoří platba daně za elektřinu (34,20 Kč/MWh), platba za systémové služby (92,20 Kč/MWh), podpora elektřiny z podporovaných zdrojů energie (599 Kč/MWh) a fixní platba za činnosti operátora na trhu (7,70 Kč/měsíc). Celkové fixní náklady jsou dány součet všech výše zmíněných fixních náklady a jsou rovny 775,20 Kč/rok. Tato částka

bude rozpočítána mezi obě zařízení. Cena elektrické energie využívané zařízením pro napařování činí po sečtení veškerých variabilních nákladů 7519,10 Kč/rok, energie pro napařovací zařízení stojí 4748,10 Kč. Po rozpočítání fixní platby jsou celkové náklady na elektřinu v případě napařování 7906,70 Kč/rok a v případě napařování pak 5135,70 Kč/rok. Po vydělení těchto částek počtem vyrobených kusů za rok (3 024 napařených výrobků a 1 764 naprášených výrobků) získám náklady spojené s elektrickou energií na 1 výrobek. Pro napařování jsou tyto náklady 2,60 Kč, pro napařování 2,90 Kč.

### 5.2.10 Náklady na ostatní položky

Do této kapitoly spadají náklady na pracovní plyn, konkrétně argon, kterého se využívá pouze při napařování. Argon se do recipientu dávkuje z lahve o objemu 18,8 l natlakované na 20 MPa. Při procesu napařování dosahuje tlak v recipientu hodnoty 2 Pa. Pokud by nevznikaly žádné ztráty plynu netěsnostmi, vystačila by jedna lahev teoreticky na přibližně 10 milionů výrobků. Právě netěsnostmi kolem kohoutů však uniká naprostá většina argonu a jedna lahev tedy vystačí na přibližně 7 000 výrobků. Při ceně 1 440 Kč za lahev jsou náklady spojené s argonem na jeden výrobek po zaokrouhlení 0,30 Kč. Jedná se tedy o relativně zanedbatelnou částku.

Náklady na chladicí vodu, ochranné rukavice a jiné pomůcky jsou velmi malé i v porovnání s náklady na argon, nebude je tedy při dalších výpočtech uvažovat.

### 5.2.11 Celkové náklady

Než zanesu do tabulky veškerá data, která jsem vypočítal v kapitolách 5.2.1 až 5.2.10, je třeba rozpočítat částky ročních odpisů na 1 vyrobenou vrstvu pomocí vzorce uvedeného v kapitole 5.2.6. Odpisy kompletní napařovací soupravy činí 377 274 Kč, za rok je napařeno 3 024 tenkých vrstev. Tyto náklady na 1 vrstvu jsou tedy 124,80 Kč. V případě napařovací soupravy jsou odpisy rovny 538 310 Kč a naprášeno je za rok 1 764 tenkých vrstev. Náklady na 1 vrstvu v tomto případě činí 128,40 Kč. Všechny náklady z předešlých kapitol jsou nyní přepočteny na 1 vrstvu a lze tyto údaje tedy porovnat v tabulce:

Tab. 5.7: Porovnání nákladů na výrobu tenkých vrstev napařováním a napařováním

	Napařování	Napařování
Přímé odpisy [CZK/ks]	124,80	305,20
Náklady na mzdy, sociální a zdravotní pojištění [CZK/ks]	111,30	190,70
Náklady na materiál [CZK/ks]	8,70	17,40
Náklady na elektřinu [CZK/ks]	2,60	2,90
Náklady na ostatní položky [CZK/ks]	0,00	0,30
<b>Celkové náklady [CZK/ks]</b>	<b>244,50</b>	<b>516,50</b>

Z Tab. 5.7 lze jasně vidět, že tyto náklady jsou tak vysoké, že při eventuálním uvedení na trh by tato nabídka nebyla schopná obstát v jakékoliv konkurenci. To je dáno především tím, že laboratorní zařízení dokáže vyrábět pouze 1 výrobek v daném čase a také proto, že náklady na 1 výrobek jsou v naprosté většině závislé právě na množství vyrobených vrstev za rok. Celkový počet vyrobených vzorků nemá vliv pouze na náklady na materiál a pracovní plyn, což jsou v celkové sumě prakticky nepodstatné částky.

# Závěr

Ve třech kapitolách teoretické části jsem vytvořil ucelený přehled o problematice tenkých vrstev. Nejprve jsem v kapitole 1 definoval termín tenká vrstva, popsal základní rozdíly mezi tlustovrstvými a tenkovrstvými technologiemi a také podal informace o využití tenkých vrstev v dnešní době, abych mohl v dalších kapitolách přejít k detailnějším problémům tohoto tématu. V kapitole 2 jsem se věnoval procesu růstu tenké vrstvy od atomů až po kompletní vrstvu a důležitým vlivům, které mají na tento proces zásadní vliv. Podrobněji jsem rozebral problematiku vakua, neboť právě kvalita vakua má na depozici tenkých vrstev největší dopad. Odvodil jsem proto vzorec pro střední volnou dráhu částice při depozici a zmínil i nejpoužívanější typy vývěv, kterými se vakuum v praxi čerpá. V rámci kapitoly 2 jsem také popsal nejvýznamnější technologie pro vytváření tenkých vrstev. Největší prostor jsem věnoval napařování a napařování, neboť se jedná o metody nejčastěji využívané v průmyslu a také proto, že tyto metody jsem využil v praktické části k výrobě vzorků. Pro obě metody jsem popsal i několik jejich nejvyužívanějších modifikací, které vznikly pro vylepšení průběhu depozice určitých materiálů. Některé z metod se dají využít pouze k nanášení vodivých materiálů, některé naopak k nanášení materiálů dielektrických a jiné jsou například uzpůsobeny k nanášení slitin různých materiálů. V rámci kapitoly 3 jsem se věnoval důležitým vlastnostem tenkých vrstev. Nejprve jsem popsal vlastnosti mechanické, tedy tloušťku, homogenitu a vnitřní pnutí a také adhezi samotné vrstvy k substrátu. Vzhledem k zaměření této práce na dielektrické materiály jsem také definoval pojem dielektrikum a nastínil různé problémy, které se s tímto druhem materiálu pojí. Posléze jsem rozebral vlastnosti elektrické. Pro kapacitu jsem odvodil vzorec, ve kterém vystupuje tloušťka a plocha dielektrika v kondenzátoru, neboť tento vzorec měl důležité využití v praktické části. Popsal jsem také ztrátový činitel  $\tan \delta$ , jehož vzorec jsem odvodil ze sériového i paralelního náhradního schématu kondenzátoru, a permitivitu.

V rámci praktické části jsem vyrobil 24 destiček, z nichž každá obsahovala 10 kondenzátorů s napařenými hliníkovými elektrodami a napařeným korundovým dielektrikem. Tyto vzorky vznikly při kombinaci 3 časů depozice a 3 výkonů generátorů napařovacího zařízení, a právě závislosti určitých vlastností (konkrétně kapacity kondenzátoru a tloušťky napařeného dielektrika) na těchto dvou podmínkách depozice jsem zkoumal. V textu jsem nejprve popsal zařízení pro napařování i napařování a výrobní postupy pro obě metody. Také jsem se věnoval veškerým materiálům, které jsem při výrobě vzorků použil. Následně jsem detailně rozebral postup měření kapacity a tloušťky a nastínil jsem problémy, se kterými jsem se během těchto měření mohl setkat. Měření jsem vyhodnotil z různých úhlů pohledu. Zkoumal jsem změnu kapacity kondenzátorů v závislosti na čase depozice, změnu kapacity kondenzátorů v závislosti na výkonu generátoru napařovacího zařízení a také změnu kapacity kondenzátorů v závislosti na jejich poloze na destičce. Protože kapacita kondenzátoru je nepřímo úměrná tloušťce dielektrika v něm, jsou veškeré zkoumané změny kapacit současně i změnami tlouštěk napařených vrstev. Dále jsem porovnal hodnoty tloušťky vypočtené z kapacity s hodnotami ručně změřenými. Toto srovnání potvrdilo předpoklad, že měření kapacity bylo mnohem přesnější než měření tloušťky pomocí zařízení Talystep. Také jsem vynesl do grafu vývoj tloušťky dielektrické vrstvy v čase pro všechny 3 výkony generátoru. Celé vyhodnocení poměrně značně ovlivnily 2 nekvalitně vyrobené vzorky (vzorek 1 vyráběný 10 minut při výkonu 80 W a vzorek 2 vyráběný 10 minut při výkonu 100 W). Kromě chyb způsobených těmito vzorky prakticky veškeré

naměřené informace a závislosti splňují teoretické předpoklady. Vliv těchto chybných vzorků na dané měření je vždy popsán u konkrétního vyhodnocení přímo v kapitole 4.5.

V kapitole 5 jsem popsal ekonomickou náročnost napařování a napařování v rámci laboratoře FEL ČVUT. Porovnání s průmyslovými zařízeními jsem byl nucen vynechat, neboť od výrobců těchto zařízení ani od společností, které je využívají k výrobě tenkých vrstev, jsem neobdržel žádná data. Odhad veškerých proměnných, které při výpočtu vystupují, by byl velmi nepřesný a vypovídající hodnota vypočteného výsledku tedy velmi malá. Po krátkém teoretickém úvodu jsem spočítal přímé náklady na jednu vyrobenou vrstvu. Do výpočtů jsem zahrnul náklady na mzdy, zdravotní a sociální pojištění, náklady na materiál, elektrickou energii a ostatní položky jako například pracovní plyn. Také jsem uvažoval anuitně rozpočítané pořizovací investice do obou zařízení. Výsledná cena činí 244,50 Kč na jednu napařenou vrstvu a 516,50 Kč na jednu vrstvu naprášenou. Jak jsem popsal přímo v kapitole 5, tyto ceny jsou velmi vysoké vzhledem k laboratorní povaze zkoumaných zařízení, kvůli které nelze vyrábět více vzorků současně.

# Literatura

- [1] SESHAN, Krishna. Handbook of thin-film deposition processes and techniques: principles, methods, equipment, and applications. 2nd ed. Norwich, N.Y.: Noyes Publications, c2002. ISBN 0-8155-1442-5.
- [2] MACH, Pavel. Tenké vrstvy [přednáška]. Praha: Elektrotechnická fakulta ČVUT. In: <https://moodle.fel.cvut.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76882/mod\\_resource/content/1/Tenke\\_vrstvy.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76882/mod_resource/content/1/Tenke_vrstvy.pdf)
- [3] Horynová, Eva. *Nevodivé tenké vrstvy vytvořené naprašováním*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Ivana BESHAIJOVÁ PELIKÁNOVÁ, PhD.
- [4] KŘEPELKA, Jaromír. Přehled použití tenkých vrstev [online prezentace]. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta. 2014.. [cit. 11.05.2018]. Záznam dostupný z: [ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/literatura/01-prehled\\_pouziti.pdf](ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/literatura/01-prehled_pouziti.pdf)
- [4] KŘEPELKA, Jaromír. Přehled použití tenkých vrstev [online prezentace]. Olomouc: Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta. 2014.. [cit. 11.05.2018]. Záznam dostupný z: [ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/literatura/01-prehled\\_pouziti.pdf](ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/literatura/01-prehled_pouziti.pdf)
- [5] Hybridní integrované obvody, tenkovrstvé a tlustovrstvé technologie a jejich využití [online prezentace]. SPŠ a SOU Trutnov. In: <http://epso.wz.cz/index1.htm> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [http://epso.wz.cz/stahovani/sps/Technol\\_III-1tlus\\_a\\_tenk.pdf](http://epso.wz.cz/stahovani/sps/Technol_III-1tlus_a_tenk.pdf)
- [6] Tenké vrstvy [online prezentace]. Plzeň: Fakulta strojní, oddělení povrchového inženýrství, ZČU. In: <https://www.opi.zcu.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [https://www.opi.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)
- [7] KORMUNDA, Martin. Mechanismy růstu tenkých vrstev [online prezentace]. Ústí nad Labem: Přírodovědecká fakulta, katedra fyziky UJEP. In: <http://physics.ujep.cz/CZ> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [http://physics.ujep.cz/~mkormund/ufptv/4\\_Prednaska\\_UFPTV.pdf](http://physics.ujep.cz/~mkormund/ufptv/4_Prednaska_UFPTV.pdf)
- [8] Atomární růst tenkých vrstev [online prezentace]. Liberec: Technická univerzita v Liberci. In: <https://nano.tul.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/321/mod\\_resource/content/1/9\\_Rustove%20modely%20vrstev.pdf](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/321/mod_resource/content/1/9_Rustove%20modely%20vrstev.pdf)
- [9] DAŘOUREK, Karel. Vybrané technologie povrchových úprav [online prezentace]. Liberec: Fakulta strojní, katedra materiálů, Technická univerzita v Liberci, 2008. In: <http://www.kmt.tul.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/VTM/vtm%20Dad/13\\_metody%20na%20vrstvy.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/13_metody%20na%20vrstvy.pdf)

- [10] 6. Základy kinetické teorie. [www.wiki.matfyz.cz](http://www.wiki.matfyz.cz) [online]. Poslední editace 06.09.2014 10:51. [cit. 17.12.2018]. Dostupné z: [http://wiki.matfyz.cz/index.php?title=6.\\_Z%C3%A1klady\\_kinetick%C3%A9\\_teorie](http://wiki.matfyz.cz/index.php?title=6._Z%C3%A1klady_kinetick%C3%A9_teorie)
- [11] Vakuum [online prezentace]. Praha: Fakulta chemicko-inženýrská VŠCHT. In: <https://fchi.vscht.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/02\\_Vakuum.pdf?redirected](https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/02_Vakuum.pdf?redirected)
- [12] ERBEN, Milan. Vakuová technika [online prezentace]. Pardubice: Fakulta chemicko-technologická, katedra obecné a anorganické chemie, Univerzita Pardubice, 2008. In: <https://fcht.upce.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: <https://fcht.upce.cz/sites/default/files/public/luva3059/vakuum-erben.pdf>
- [13] RUSŇÁK, Karel. Transportní vývěvy [online prezentace]. Plzeň: Fakulta aplikovaných věd, katedra fyziky, ZČU, 2013. In: <https://kfy.zcu.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYTV/mechan.pdf>
- [14] FIALOVÁ, Monika. VAKUOVÁ FYZIKA II. ZÍSKÁVÁNÍ NÍZKÝCH TLAKŮ [online prezentace]. Brno: Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita. In: <http://physics.muni.cz/> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [http://physics.muni.cz/~dorian/Fialova\\_Vyvevy.pdf](http://physics.muni.cz/~dorian/Fialova_Vyvevy.pdf)
- [15] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzření aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [16] Schottkyho bariéra. <https://www.vseved.cz> [online] [cit. 17.12.2018]. Dostupné z: <https://encyklopedie.vseved.cz/Schottkyho+bari%C3%A9ra>
- [17] Schéma difuzní vývěvy. In: <http://triton.paru.cas.cz/old-lem/> [online]. [cit. 17.12.2018]. Dostupné z: <http://triton.paru.cas.cz/old-lem/book/Podkap/3.6.html>
- [18] MACH, Pavel. Napařování tenkých vrstev [přednáška]. Praha: Elektrotechnická fakulta ČVUT. In: <https://moodle.fel.cvut.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76883/mod\\_resource/content/1/Naparovani\\_tenkych\\_vrstev.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76883/mod_resource/content/1/Naparovani_tenkych_vrstev.pdf)
- [19] MACH, Pavel. Napařování tenkých vrstev [přednáška]. Praha: Elektrotechnická fakulta ČVUT. In: <https://moodle.fel.cvut.cz> [online]. [cit. 17.12.2018]. Záznam dostupný z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76885/mod\\_resource/content/1/Napasovani.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/76885/mod_resource/content/1/Napasovani.pdf)
- [20] Vapor pressure curves for the more common elements. In: <http://www.lbma.org.uk/> [online]. 2015. [cit. 17.12.2018]. Dostupné z: [http://www.lbma.org.uk/assets/blog/chemist\\_articles/Alch79Complete.pdf?fbclid=IwAR2hnMucg7O7O2RMd89Zm8\\_35IKxXSPMG3FoiHtma5b6DJy4qNGOpEE9XhE](http://www.lbma.org.uk/assets/blog/chemist_articles/Alch79Complete.pdf?fbclid=IwAR2hnMucg7O7O2RMd89Zm8_35IKxXSPMG3FoiHtma5b6DJy4qNGOpEE9XhE)

- [21] Haviar, Stanislav. *Příprava a charakterizace nanostruktur pro katalýzu a detekci plynů*. Praha, 2014. Disertační práce. Univerzita Karlova v Praze. Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce doc. Mgr. Iva MATOLÍNOVÁ, Dr.
- [22] KORMUNDA, Martin. Naprašování: princip metody, magnetrony, ss naprašování, pulzní naprašování, rf naprašování naprašovací rychlost, naprašování kovů, slitin a sloučenin. [online prezentace]. Ústí nad Labem: Přírodovědecká fakulta, katedra fyziky UJEP. In: <http://physics.ujep.cz/CZ> [online]. [cit. 25.03.2019]. Záznam dostupný z: <http://physics.ujep.cz/~mkormund/P223/FMD-prednaska6.pdf>
- [23] Klusoň, Jan. *Diagnostika nízkoteplotního plazmatu pomocí Langmuirovy a emisní sondy*. Praha, 2008. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze. Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce Mgr. Pavel KUDRNA, Dr.
- [24] HOFMANN, Jaroslav a Marie URBANOVÁ. *Fyzika I*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2003. ISBN 80-7080-514-5.
- [25] DRÁPALA, Jaromír. *Materiály pro elektrotechniku*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3380-4.
- [26] LIBRA, Martin. Naprašování tenkých vrstev. ELEKTRO [online]. 2003, č. 7 [cit. 04.04.2019]. Dostupný z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/naprasovani-tenkych-vrstev--14441>. ISSN 1210-0889.
- [27] KOBLÍŽEK, Vilém. Vytváření tenkých vrstev ve vakuu [návod k laboratorní úloze]. Praha: Elektrotechnická fakulta ČVUT. In: <https://moodle.fel.cvut.cz> [online]. [cit. 04.04.2019]. Záznam dostupný z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=1767>
- [28] MACH, Pavel. Izolanty a izolované vodiče [přednáška]. Praha: Elektrotechnická fakulta ČVUT. In: <https://moodle.fel.cvut.cz> [online]. [cit. 06.04.2019]. Záznam dostupný z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/105763/mod\\_resource/content/2/IZOLANTY%202016%20FINAL%20V%C4%8C%20P%C5%98%C3%8DKLAD%C5%AE.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/105763/mod_resource/content/2/IZOLANTY%202016%20FINAL%20V%C4%8C%20P%C5%98%C3%8DKLAD%C5%AE.pdf)
- [29] PANKRÁČ, Vítězslav, Pavel HAZDRA a Karel NOVOTNÝ. *Teorie elektromagnetického pole: příklady*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03320-1.
- [30] Iontové, reaktivní, magnetronové naprašování, iomtová implementace [online prezentace]. Praha: Fakulta chemicko-inženýrská VŠCHT. In: <https://fchi.vscht.cz> [online]. [cit. 13.04.2019]. Záznam dostupný z: [https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/04\\_naprasovani.pdf?redirected](https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/04_naprasovani.pdf?redirected)
- [31] CHRISEY, Douglas B., HUBLER, Graham K. PULSED LASER DEPOSITION OF THIN FILMS. [online prezentace]. University of Nebraska-Lincoln. In: <https://xiaoshanxu.unl.edu> [online]. [cit. 13.04.2019]. Záznam dostupný z: [https://xiaoshanxu.unl.edu/system/files/sites/unl.edu.cas.physics.xiaoshanxu/files/private/2014\\_09\\_12\\_Pulsed%20laser%20deposition%20of%20thin%20films%20Chp%205%20Part1.pdf?fbclid=IwAR1PHBh4E7yfK-3ox5nUIITIFXuuje1LPBa-L4WSHB\\_PCh9h\\_uta\\_l6MrQI](https://xiaoshanxu.unl.edu/system/files/sites/unl.edu.cas.physics.xiaoshanxu/files/private/2014_09_12_Pulsed%20laser%20deposition%20of%20thin%20films%20Chp%205%20Part1.pdf?fbclid=IwAR1PHBh4E7yfK-3ox5nUIITIFXuuje1LPBa-L4WSHB_PCh9h_uta_l6MrQI)



- [32] KOCOUREK, Tomáš, JELÍNEK, Miroslav. Laserová depozice tenkých vrstev. [online prezentace]. Fyzikální ústav AV ČR. In: <https://docplayer.cz/> [online]. [cit. 13.04.2019]. Záznam dostupný z: <https://docplayer.cz/4717431-Laserova-depozice-tenkych-vrstev.html>
- [33] HULICIUS, Eduard. Příprava polovodičových nanostruktur. [online prezentace]. Fyzikální ústav AV ČR. In: <https://nano.tul.cz/> [online]. [cit. 13.04.2019]. Záznam dostupný z: [https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/2670/mod\\_resource/content/1/3%2C%204%2C%205\\_Uvod%20do%20epitaxe%2C%20MBE%2C%20MOCVD\\_2013.pdf?fbclid=IwAR1s97OQGJvr\\_U3hWHR859mHNXnFVxpcbXYtM7CV2vWkSnX7ndbNxNVNIQc](https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/2670/mod_resource/content/1/3%2C%204%2C%205_Uvod%20do%20epitaxe%2C%20MBE%2C%20MOCVD_2013.pdf?fbclid=IwAR1s97OQGJvr_U3hWHR859mHNXnFVxpcbXYtM7CV2vWkSnX7ndbNxNVNIQc)
- [34] DEPLA, D, MAHIEU, S, GREENE, J.E. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coating. 3rd ed. William Andrew Publishing, 2010. ISBN 9780815520313.
- [35] KOBLÍŽEK, Vilém. Dielektrické vlastnosti tuhých látek [návod k laboratorní úloze]. Praha: Elektrotechnická fakulta ČVUT. In: <https://moodle.fel.cvut.cz> [online]. [cit. 14.04.2019]. Záznam dostupný z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/105293/mod\\_resource/content/1/uloha\\_4\\_dielektricke-vlastnosti-tuhych-latek.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/105293/mod_resource/content/1/uloha_4_dielektricke-vlastnosti-tuhych-latek.pdf)
- [36] KOUTNÝ, Jaroslav, VLK, Ivo. Elektronika I učebnice. Olomouc: Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola elektrotechnická, 2009. Obrázky dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/558>
- [37] Dielektrická a magnetická polarizace [online prezentace]. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta UK, katedra fyziky povrchu a plazmatu. In: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/> [online]. [cit. 07.05.2019]. Záznam dostupný z: [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/eImag/7\\_2](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/eImag/7_2)
- [38] FIALOVÁ, Helena, FIALA, Jan. EKONOMICKÝ SLOVNÍK s odborným výkladem česky a anglicky. 3. rozšířené vydání. A plus, 2014. ISBN 978-80-87681-02-2.
- [39] Kalkulace nákladů [online prezentace]. Brno: Mendelova univerzita. In: <https://is.mendelu.cz/eknihovna/> [online]. [cit. 07.05.2019]. Záznam dostupný z: [https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz\\_cast.pl?cast=54548](https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=54548)
- [40] POPEŠKO, Boris. Manažerské účetnictví – Komplexní průvodce ve třetím vydání. Politická Ekonomie [online]. 2011 [cit. 07.05.2019]. ISSN 0032-3233.
- [41] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Tab. 03.04 Míra inflace, vývoj spotřebitelských cen vybraných výrobků v České republice. [online]. 17.05.2017 In: <https://www.czso.cz/csu/czso/ceska-republika-od-roku-1989-v-cislech-w0i9dxmghn> [cit. 08.05.2019]. Dostupné z: [https://www.czso.cz/documents/10180/46173161/32018117\\_0304.pdf/0b0b0519-2d89-498b-b7e4-a7b362618ecd?version=1.0](https://www.czso.cz/documents/10180/46173161/32018117_0304.pdf/0b0b0519-2d89-498b-b7e4-a7b362618ecd?version=1.0)
- [42] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Inflace – druhy, definice, tabulky. [online]. 10.04.2019 [cit. 08.05.2019]. Dostupné z: [https://www.czso.cz/csu/czso/mira\\_inflace](https://www.czso.cz/csu/czso/mira_inflace)

- [43] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Průměrné hrubé měsíční mzdy v Praze ve 4. čtvrtletí 2018. [online]. 08.03.2019 [cit. 08.05.2019]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/xa/prumerne-hrube-mesicni-mzdy-v-praze-ve-4-ctvrtleti-2018>
- [44] Kurzovní lístek ČNB na středu 02.01.2019. [online]. 02.01.2019 [cit. 08.05.2019]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/zpravy/478220-kurzovni-listek-cnb-na-stredu-02-01-2019/>
- [45] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. Cenový kalkulačtor. [online]. 11.04.2019. Dostupné z: <http://kalkulator.eru.cz/>
- [46] DYBA, Karel. Měříme správně inflaci? [online přednáška]. Praha, 2002. [cit.14.04.2019]. Záznam dostupný z: <http://www.cepin.cz/cze/prednaska.php?ID=189>

# Seznam příloh

Příloha A	Tabulka naměřených hodnot kapacit C, jejich aritmetických průměrů $\bar{C}$ a odchylek $\sigma$ kapacit C jednotlivých kondenzátorů od průměru $\bar{C}$ pro 10 minut a všechny 3 výkony generátoru .....xii
Příloha B	Tabulka naměřených hodnot kapacit C, jejich aritmetických průměrů $\bar{C}$ a odchylek $\sigma$ kapacit C jednotlivých kondenzátorů od průměru $\bar{C}$ pro 20 minut a všechny 3 výkony generátoru .....xiii
Příloha C	Tabulka naměřených hodnot kapacit C, jejich aritmetických průměrů $\bar{C}$ a odchylek $\sigma$ kapacit C jednotlivých kondenzátorů od průměru $\bar{C}$ pro 30 minut a všechny 3 výkony generátoru .....xiv
Příloha D	Tabulka hodnot vypočítané tloušťky d z průměrné kapacity $\bar{C}$ každého vzorku pro všechny vzorky .....xv
Příloha E	Fotografie vyrobeného vzorku .....xvi
Příloha F	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 80 W a 10 minut (1_1, 1_2, 1_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xvii
Příloha G	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 100 W a 10 minut (2_1, 2_2, 2_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xviii
Příloha H	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 120 W a 10 minut (3_1, 3_2), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xviii
Příloha I	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 80 W a 20 minut (4_1, 4_2, 4_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xix
Příloha J	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 100 W a 20 minut (5_1, 5_2), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xix
Příloha K	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 120 W a 20 minut (6_1, 6_2), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xx
Příloha L	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 80 W a 30 minut (7_1, 7_2, 7_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xx
Příloha M	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 100 W a 30 minut (8_1, 8_2, 8_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xxi
Příloha N	Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 120 W a 30 minut (9_1, 9_2, 9_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně .....xxi
Příloha O	Tabulka rozměrů stran kondenzátorů m a n a obsah této plochy S.....xxii
Příloha P	Tabulka změn cen analyzovaných zařízení vlivem inflace v průběhu let .....xxii

## Příloha A

Příloha A: Tabulka naměřených hodnot kapacit C, jejich aritmetických průměrů  $\bar{C}$  (z vzorků  $x_1$  a  $x_2$ ) a odchylek  $\sigma$  kapacit C jednotlivých kondenzátorů od průměru  $\bar{C}$  pro 10 minut a všechny 3 výkony generátoru

Číslo kondenzátoru	80 W–10 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	1_1	1_2	1_3		
1	4525	4764	4290	4645	2,57
2	3168	3573	3083	3371	6,01
3	2432	2838	2367	2635	7,70
4	2113	2733	2195	2423	12,79
5	1888	2467	1751	2177	13,31
6	2187	2739	2022	2463	11,21
7	2594	3056	2434	2825	8,18
8	2970	3362	2824	3166	6,19
9	3349	3795	3155	3572	6,24
10	4229	4805	3963	4517	6,38
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>2829</b>	<b>8,06</b>
Číslo kondenzátoru	100 W–10 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	2_1	2_2	2_3		
1	4564	4068	2989	4316	5,75
2	3579	3528	2435	3554	0,72
3	2849	2854	1790	2852	0,09
4	2570	2638	1577	2604	1,31
5	2137	2140	1253	2139	0,07
6	2580	2443	1456	2512	2,73
7	3147	2894	1795	3021	4,19
8	3528	3283	2190	3406	3,60
9	3855	3659	2551	3757	2,61
10	4546	4330	3082	4438	2,43
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>2980</b>	<b>2,35</b>
Číslo kondenzátoru	120 W–10 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	3_1	3_2	3_3		
1	2470	2353	-	2412	2,43
2	1891	1664	-	1777	6,38
3	1455	1246	-	1350	7,72
4	1266	1057	-	1162	8,96
5	1021	889	-	955	6,91
6	1149	1041	-	1095	4,93
7	1422	1291	-	1357	4,84
8	1718	1574	-	1646	4,37
9	2041	1852	-	1947	4,85
10	2584	2408	-	2496	3,53
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>1411</b>	<b>5,49</b>

## Příloha B

Příloha B: Tabulka naměřených hodnot kapacit C, jejich aritmetických průměrů  $\bar{C}$  (z vzorků  $x_1$  a  $x_2$ ) a odchylek  $\sigma$  kapacit C jednotlivých kondenzátorů od průměru  $\bar{C}$  pro 20 minut a všechny 3 výkony generátoru

Číslo kondenzátoru	80 W–20 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	4_1	4_2	4_3		
1	3692	3719	2982	3706	0,36
2	2752	2867	2020	2810	2,05
3	2137	2313	1753	2225	3,96
4	2234	2270	1543	2252	0,80
5	2088	2008	1311	2048	1,95
6	2302	2248	1561	2275	1,19
7	2582	2593	1729	2588	0,21
8	2558	2800	1989	2679	4,52
9	2915	3061	2160	2988	2,44
10	3850	3800	2561	3825	0,65
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>2483</b>	<b>1,81</b>
Číslo kondenzátoru	100 W–20 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	5_1	5_2	5_3		
1	2040	2229	-	2135	4,43
2	1389	1698	-	1543	10,01
3	1139	1367	-	1253	9,10
4	911	991	-	951	4,19
5	800	1195	-	997	19,83
6	927	1202	-	1065	12,94
7	1073	1510	-	1291	16,95
8	1309	1671	-	1490	12,15
9	1534	1862	-	1698	9,65
10	1938	2215	-	2076	6,68
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>1286</b>	<b>10,59</b>
Číslo kondenzátoru	120 W–20 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	6_1	6_2	6_3		
1	1426	1752	-	1589	10,24
2	991	1257	-	1124	11,85
3	819	946	-	883	7,17
4	711	796	-	754	5,64
5	593	687	-	640	7,29
6	521	771	-	646	19,36
7	715	905	-	810	11,75
8	881	1111	-	996	11,53
9	1211	1339	-	1275	5,02
10	1262	1709	-	1485	15,07
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>1411</b>	<b>5,49</b>

### Příloha C

Příloha C: Tabulka naměřených hodnot kapacit C, jejich aritmetických průměrů  $\bar{C}$  (z vzorků  $x_1$  a  $x_2$ ) a odchylek  $\sigma$  kapacit C jednotlivých kondenzátorů od průměru  $\bar{C}$  pro 30 minut a všechny 3 výkony generátoru

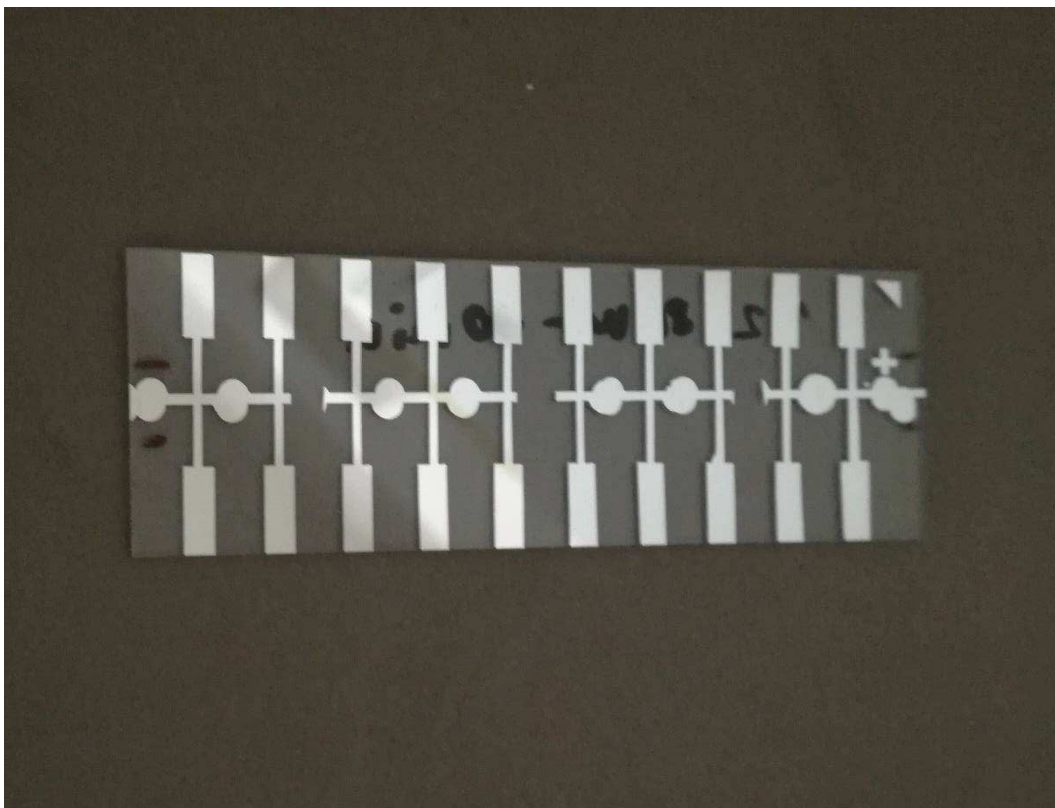
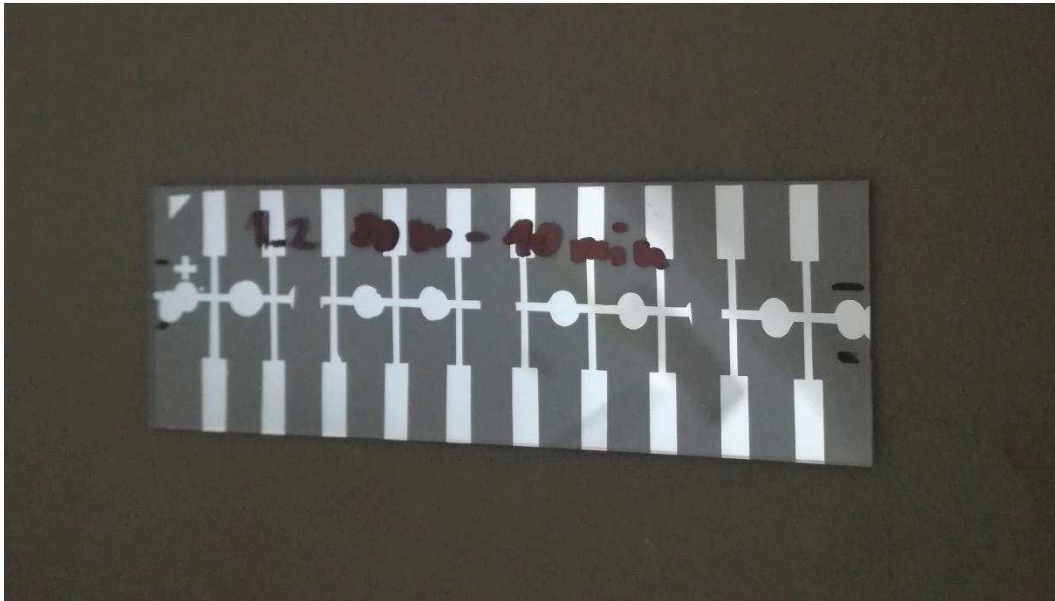
Číslo kondenzátoru	80 W–30 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	7_1	7_2	7_3		
1	2591	2409	1535	2500	3,64
2	1818	1812	1138	1815	0,17
3	1430	1370	927	1400	2,14
4	1496	1401	762	1449	3,28
5	1363	1222	732	1293	5,45
6	1471	1428	760	1450	1,48
7	1641	1579	980	1610	1,93
8	1587	1626	1173	1607	1,21
9	1874	1887	1378	1881	0,35
10	2451	2429	1763	2440	0,45
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>1563</b>	<b>2,01</b>
Číslo kondenzátoru	100 W–30 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	8_1	8_2	8_3		
1	1368	1519	2144	1444	5,23
2	910	1084	1638	997	8,72
3	717	947	1278	832	13,84
4	689	883	1179	786	12,34
5	591	779	1042	685	13,72
6	635	864	1220	749	15,28
7	756	1012	1368	884	14,45
8	910	1143	1455	1026	11,35
9	1030	1324	1558	1177	12,51
10	1293	1757	1926	1525	15,21
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>892</b>	<b>12,27</b>
Číslo kondenzátoru	120 W–30 min				
	C [pF]			$\bar{C}$ [pF]	$\sigma$ [pF]
	9_1	9_2	9_3		
1	956	935	1444	946	1,12
2	722	617	1118	670	7,87
3	545	495	837	520	4,78
4	485	441	700	463	4,71
5	391	369	532	380	2,84
6	382	302	687	342	11,72
7	548	481	907	514	6,48
8	656	579	1004	618	6,27
9	762	683	1168	722	5,46
10	913	959	1493	936	2,45
<b>Aritmetický průměr hodnot <math>\bar{C}</math> (2 až 9) a <math>\sigma</math> (1 až 10)</b>				<b>529</b>	<b>5,37</b>

## Příloha D

Příloha D: Tabulka hodnot vypočítané tloušťky  $\bar{d}$  z průměrné kapacity  $\bar{C}$  každého vzorku pro všechny vzorky

Číslo kondenzátoru	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3	
	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]
1	4645	10,81	4316	11,63	2412	20,82
2	3371	14,89	3554	14,13	1777	28,25
3	2635	19,05	2852	17,61	1350	37,18
4	2423	20,72	2604	19,28	1162	43,22
5	2177	23,06	2139	23,48	955	52,58
6	2463	20,38	2512	19,99	1095	45,87
7	2825	17,77	3021	16,62	1357	37,01
8	3166	15,86	3406	14,74	1646	30,49
9	3572	14,05	3757	13,36	1947	25,79
10	4517	11,11	4438	11,31	2496	20,11
Číslo kondenzátoru	Vzorek 4		Vzorek 5		Vzorek 6	
	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]
1	3706	13,55	2135	23,52	1589	31,59
2	2810	17,87	1543	32,53	1124	44,67
3	2225	22,56	1253	40,06	883	56,87
4	2252	22,29	951	52,78	754	66,63
5	2048	24,51	997	50,34	640	78,46
6	2275	22,07	1065	47,16	646	77,70
7	2588	19,40	1291	38,88	810	62,01
8	2679	18,74	1490	33,69	996	50,39
9	2988	16,80	1698	29,56	1275	39,38
10	3825	13,12	2076	24,18	1485	33,80
Číslo kondenzátoru	Vzorek 7		Vzorek 8		Vzorek 9	
	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]	$\bar{C}$ [pF]	$\bar{d}$ [nm]
1	2500	20,08	1444	34,78	946	53,09
2	1815	27,66	997	50,35	670	74,96
3	1400	35,86	832	60,35	520	96,57
4	1449	34,66	786	63,87	463	108,47
5	1293	38,84	685	73,29	380	132,18
6	1450	34,63	749	66,99	342	146,75
7	1610	31,18	884	56,78	514	97,60
8	1607	31,25	1026	48,91	618	81,27
9	1881	26,70	1177	42,66	722	69,49
10	2440	20,57	1525	32,92	936	53,63

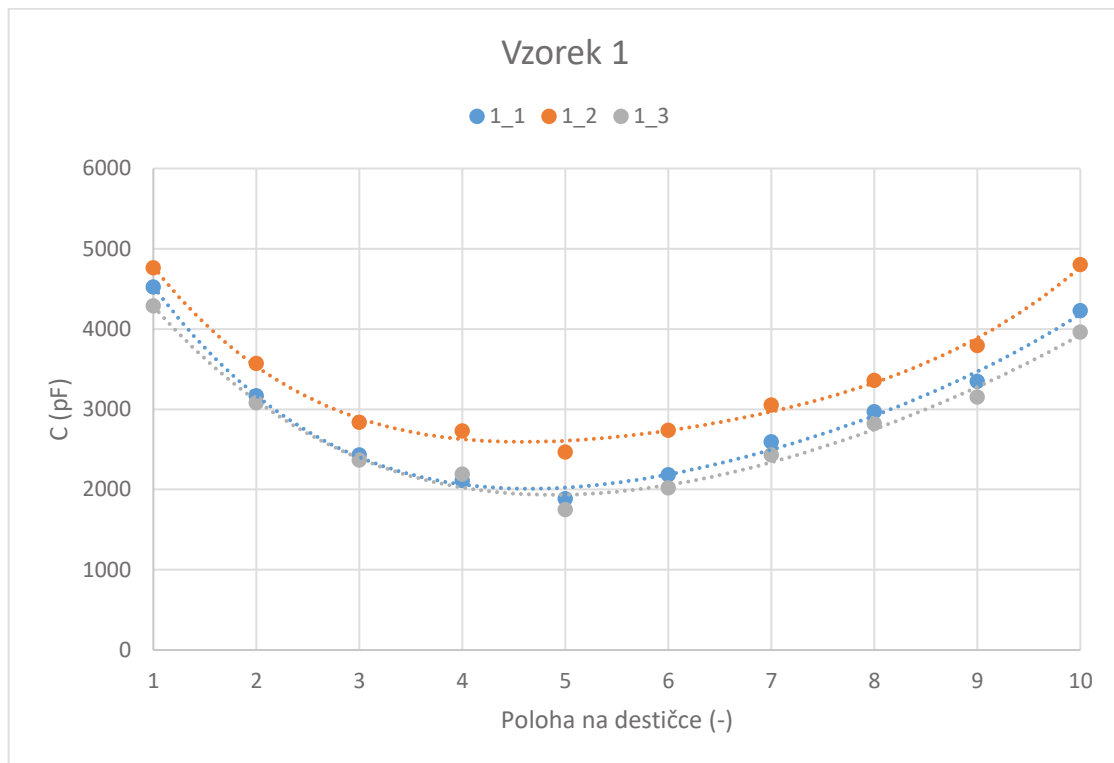
Příloha E



Příloha E: Fotografie vyrobeného vzorku



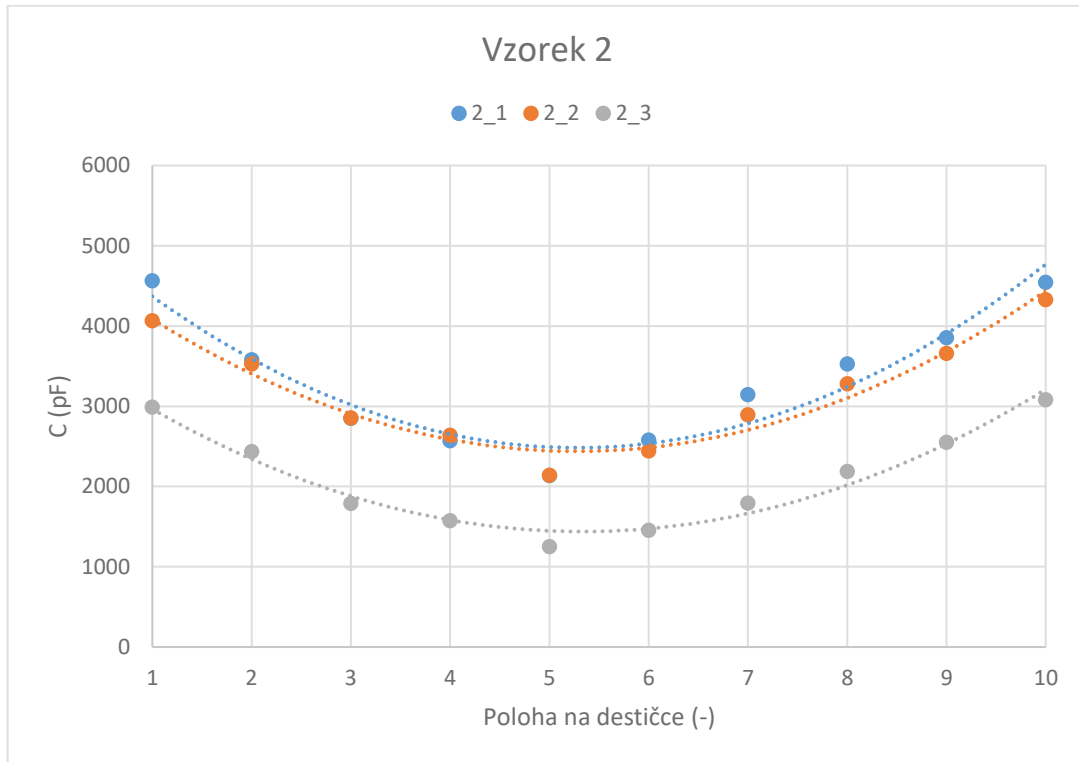
## Příloha F



Příloha F: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 80 W a 10 minut (1\_1, 1\_2, 1\_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

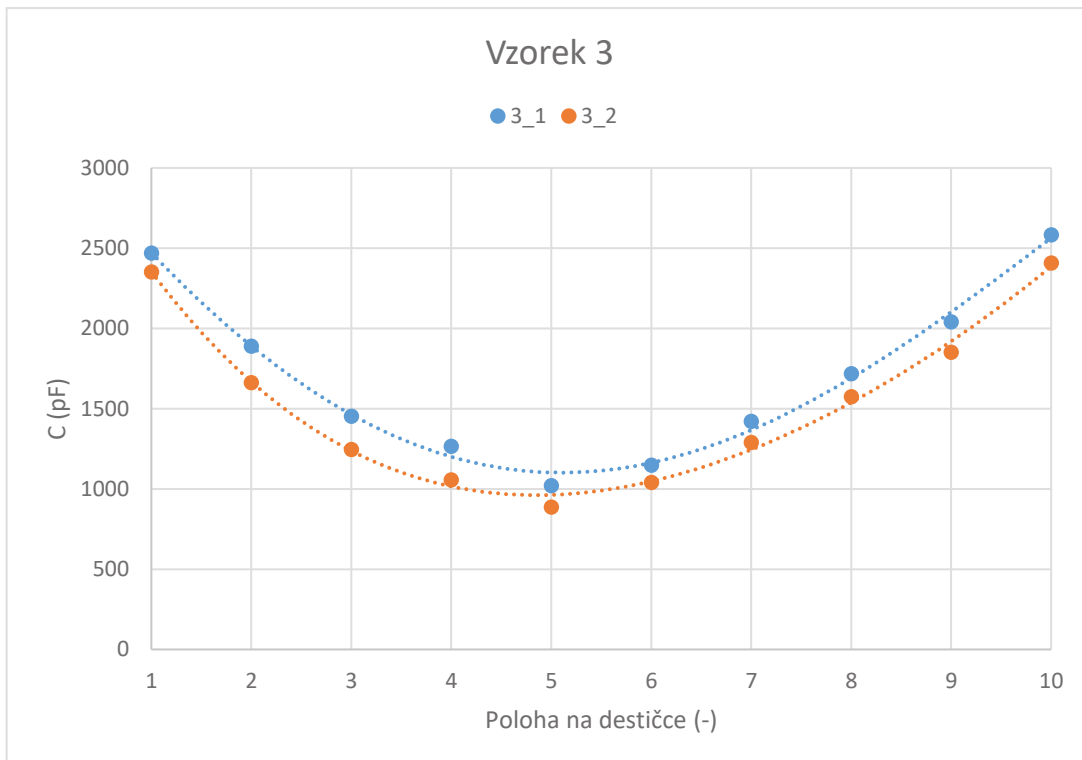
Pozn. Vzorek 1\_3 byl vyřazen z dalšího vyhodnocování i přesto, že splňoval danou toleranci 20 % oproti průměru, neboť při jeho procesu výroby došlo k velkým výkyvům.

### Příloha G



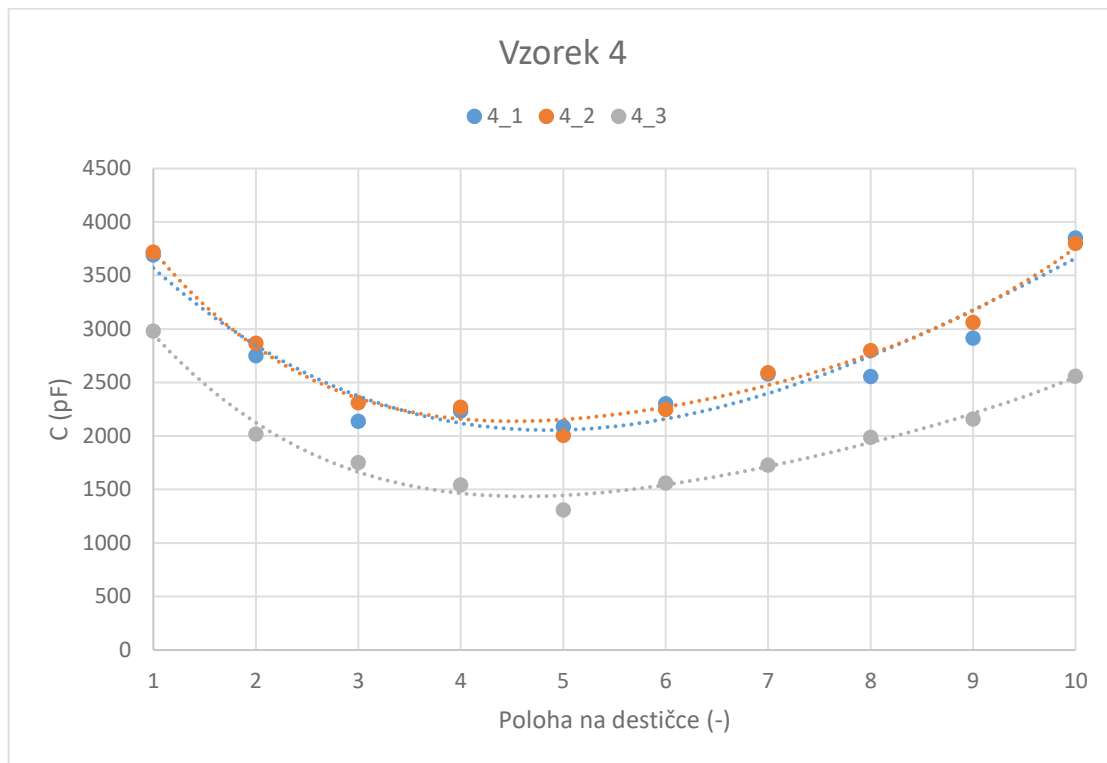
Příloha G: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 100 W a 10 minut (2\_1, 2\_2, 2\_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

### Příloha H



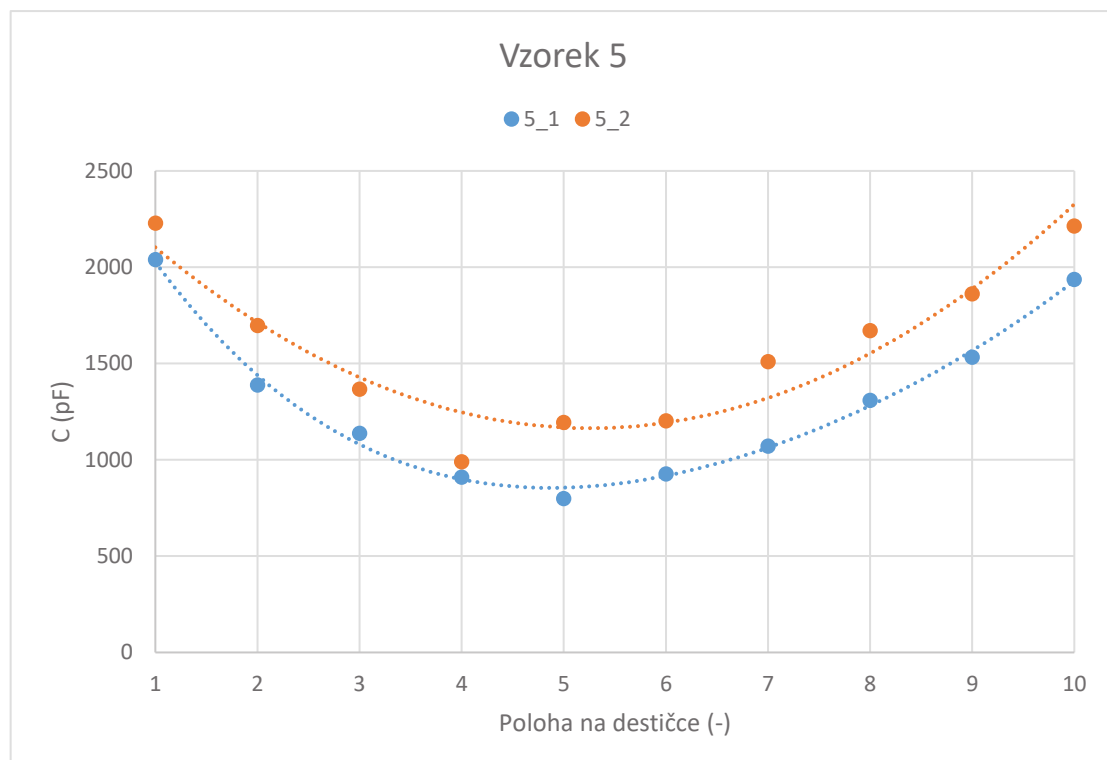
Příloha H: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 120 W a 10 minut (3\_1, 3\_2), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

### Příloha I



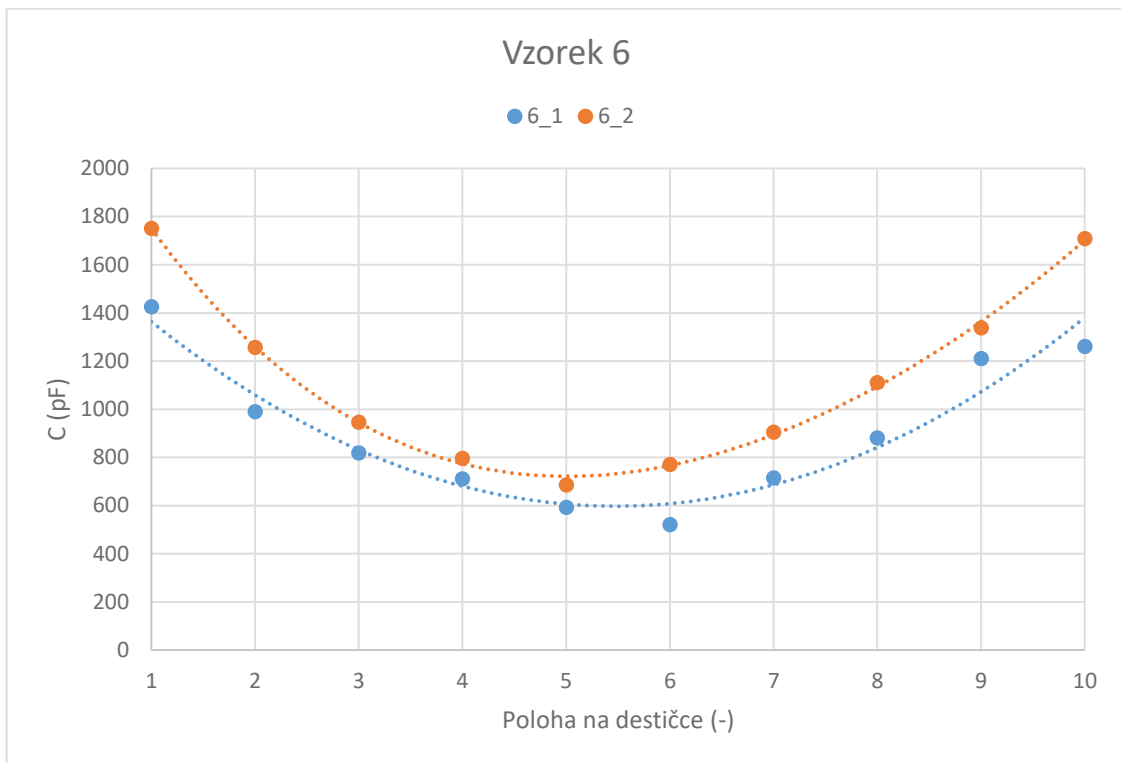
Příloha I: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 80 W a 20 minut (4\_1, 4\_2, 4\_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

### Příloha J



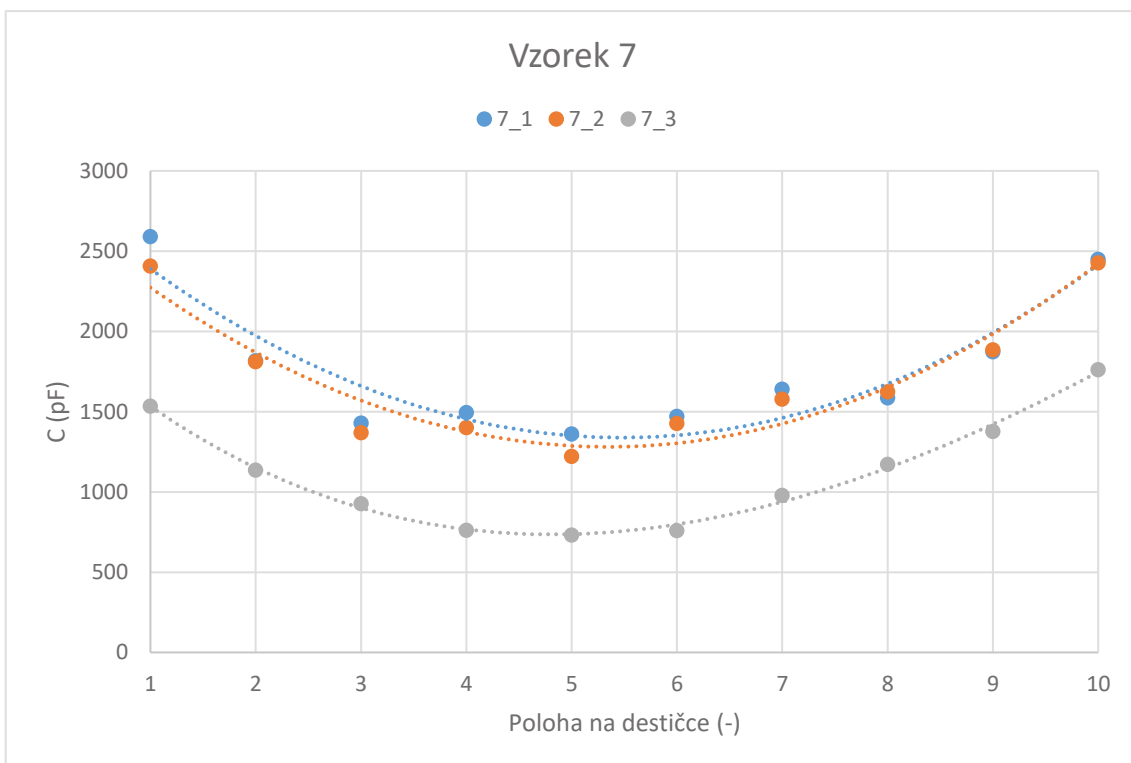
Příloha J: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 100 W a 20 minut (5\_1, 5\_2), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

### Příloha K



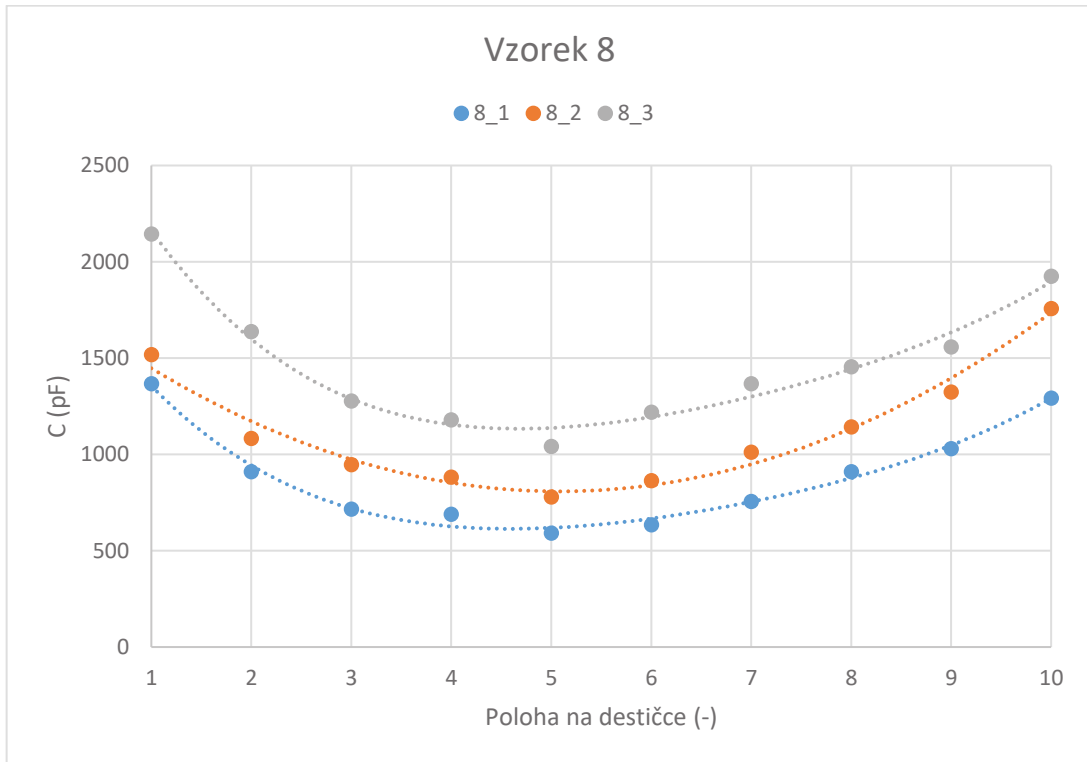
Příloha K: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 120 W a 20 minut (6\_1, 6\_2), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

### Příloha L



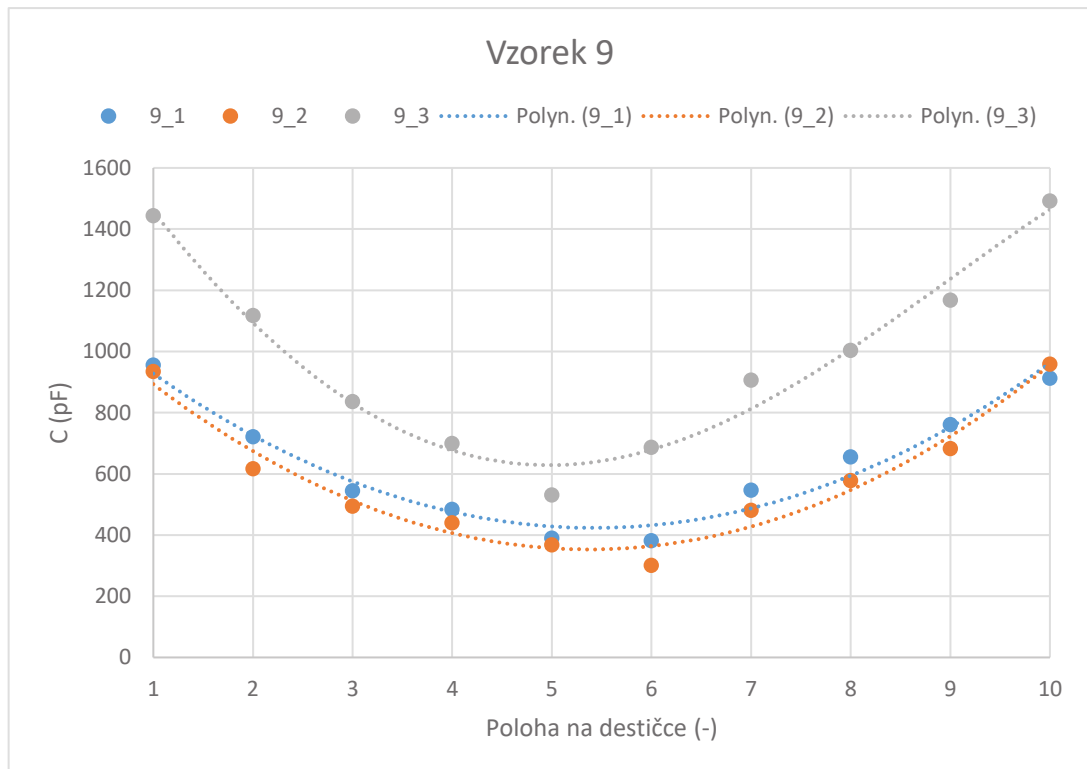
Příloha L: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 80 W a 30 minut (7\_1, 7\_2, 7\_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

### Příloha M



Příloha M: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 100 W a 30 minut (8\_1, 8\_2, 8\_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

### Příloha N



Příloha N: Graf naměřených hodnot kapacit vzorků v závislosti na poloze na destičce pro 120 W a 30 minut (9\_1, 9\_2, 9\_3), proloženo polynomem 2. a 4. stupně

## Příloha O

Příloha O: Tabulka rozměrů stran kondenzátorů m a n a obsah této plochy S

	m [mm]	n [mm]	S
	0,72	0,83	0,567
	0,70	0,84	
	0,69	0,82	
	0,70	0,79	
	0,69	0,77	
<b>Průměr</b>	<b>0,70</b>	<b>0,81</b>	

## Příloha P

Příloha P: Tabulka změn cen analyzovaných zařízení vlivem inflace v průběhu let

Zařízení	Původní cena [CZK]	Rok zakoupení [-]
Napařovací zařízení Balzers Pfeiffer	1 490 495	1995
Kompresor	10 612	2006
Dávkovací vakuový systém	51 700	2004
Plovákový průtokoměr	5 995	2002
Napařovací zařízení Edwards	199 189	1968
Redukční ventil	12 483	2018

Rok	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Inflace [-]	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Cena zařízení v daném roce	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	<b>199 183,0</b>	<b>205 756,0</b>	<b>212 546,0</b>	<b>219 560,0</b>	<b>226 805,5</b>	<b>234 290,1</b>
	-	-	-	-	-	-
1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
<b>242 021,6</b>	<b>250 008,4</b>	<b>258 258,6</b>	<b>266 781,2</b>	<b>275 584,9</b>	<b>284 679,2</b>	<b>294 073,7</b>
-	-	-	-	-	-	-
1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
<b>303 778,1</b>	<b>313 802,8</b>	<b>324 158,3</b>	<b>334 855,5</b>	<b>345 905,7</b>	<b>357 320,6</b>	<b>369 112,2</b>
-	-	-	-	-	-	-

1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
0,033	0,014	0,097	0,566	0,111	0,208	0,100
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
381 292,9	386 631,0	424 134,2	664 194,1	737 919,7	891 407	980 547,7
-	-	-	-	-	-	-
1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
0,091	0,088	0,085	0,107	0,021	0,039	0,047
<b>1 490 495,0</b>	<b>1 621 658,6</b>	<b>1 759 499,5</b>	<b>1 947 766,0</b>	<b>1 988 669,1</b>	<b>2 066 227,2</b>	<b>2 163 339,8</b>
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-
1 069 777,5	1 163 917,9	1 262 851	1 397 976	1 427 333,5	1 482 999,5	1 552 700,5
-	-	-	-	-	-	-
2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
0,018	0,001	0,028	0,019	0,025	0,028	0,063
<b>2 202 280,0</b>	<b>2 204 482,2</b>	<b>2 266 207,7</b>	<b>2 309 265,7</b>	<b>2 366 997,3</b>	<b>24 33 273,3</b>	<b>2 586 569,5</b>
-	-	-	-	<b>10 612,0</b>	10 909,1	11 596,4
-	-	<b>51 700,0</b>	52 682,3	53 999,4	55 511,3	59 008,6
<b>5 995,0</b>	6 001,0	6 169,0	6 286,2	6 443,4	6 623,8	7 041,1
<b>1 580 649,1</b>	<b>1 582 229,8</b>	<b>1 626 532,2</b>	<b>1 657 436,3</b>	<b>1 698 872,2</b>	<b>1 746 440,6</b>	<b>1 856 466,4</b>
-	-	-	-	-	-	-
2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
0,010	0,015	0,019	0,033	0,014	0,004	0,003
<b>2 612 435,2</b>	<b>2 651 621,7</b>	<b>2 702 002,5</b>	<b>2 791 168,6</b>	<b>2 830 245,0</b>	<b>2 841 565,9</b>	<b>2 850 090,6</b>
11 712,4	11 888,1	12 113,9	12 513,7	12 688,9	12 739,6	12 777,9
59 598,6	60 492,6	61 642,0	63 676,2	64 567,6	64 825,9	65 020,4
7 111,5	7 218,2	7 355,3	7 598,1	7 704,4	7 735,3	7 758,5
<b>1 875 031,1</b>	<b>1 903 156,5</b>	<b>1 939 316,5</b>	<b>2 003 313,9</b>	<b>2 031 360,3</b>	<b>2 039 485,8</b>	<b>2 045 604,2</b>
-	-	-	-	-	-	-
2016	2017	2018				
0,007	0,025	0,021				
<b>2 870 041,3</b>	<b>2 941 792,3</b>	<b>3 003 569,9</b>				
12 867,3	13 189,0	<b>13 466,0</b>				
65 475,5	67112,4	<b>68 521,8</b>				
7 812,8	8 008,1	<b>8 176,3</b>				
<b>2 059 923,5</b>	<b>2 111 421,6</b>	<b>2 155 761,4</b>				
-	-	<b>12 483</b>				