

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Tenkvrstvé procesy v elektronice**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin FEJT**  
Osobní číslo: **E08B0316P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Tenkovrstvé procesy v elektronice**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte metody vytváření tenkých vrstev v oblasti technologie elektroniky s důrazem na technologii napařování a naprašování.
2. Popište detailně metody naprašování a napařování včetně konstrukce patřičných zařízení.
3. Stanovte požadavky a postupy pro depozici kovových a organických materiálů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- 1. Elektronické informační zdroje**
- 2. Milan Erben: Vakuová technika - Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií, 2008, Pardubice**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Řeboun, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jan Řeboun, Ph.D.**  
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2010**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřena na tenkovrstvé procesy v elektrotechnice. Jedná se o velice důležitou a rozšířenou oblast, která zasahuje velké spektrum aplikací, od výroby samostatných součástek až po integrované obvody. V práci jsou popsány postupy pro vytváření tenkých vrstev včetně zařízení k tomu potřebných, jako jsou vývěvy, vakuoměry a další. V poslední části práce jsou popsány výsledky experimentu provedeného za účelem bližšího pochopení problematiky a ověření předpokladů.

## **Klíčová slova**

tenké vrstvy, depozice, napařování, naprašování, vývěvy, substráty, uhlík, hliník, zlato, argon, magnetron,

## **Abstract**

The bachelor thesis is focused on thin-film processes in electronics. This field of electronics is very important and widely applied. Such as manufacturing electric components or integrated circuits. Necessary devices like vacuum pumps, vacuum gauges and etc. are described including procedures of depositing thin layers. The results of experiment made for better understanding and validation of expected hypothesis is located in the last part of my thesis.

## **Key words**

thin layers, deposition, evaporation, shuttering, vacuum pump, substrate, carbon, aluminum, gold, argon, magnetron

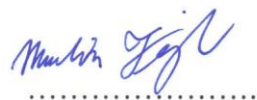
## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 5.6.2012



.....

Martin Fejt

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mojí bakalářské práce Ing. Janu Řebounovi, Ph.D. za přínosné poznámky, rady a doporučení k této práci.

Dále pracovníkům KET, kteří se zabývají depozicí tenkých vrstev, za možnost účasti na experimentech a získání dalších cenných poznatků.

Martin Fejt

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2 PŘEHLED VAKUOVÝCH PROCESŮ A ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>11</b>
2.1 NAPAŘOVÁNÍ.....	11
2.2 NAPRAŠOVÁNÍ.....	12
2.3 VÝVĚVY .....	13
2.3.1 Rotační olejová vývěva.....	14
2.3.2 Difúzní vývěva.....	15
2.3.3 Membránová vývěva .....	15
2.3.4 Turbomolekulární vývěva.....	16
2.4 VAKUOMĚRY .....	17
2.4.1 Piranního vakuoměr.....	17
2.4.2 Penningův vakuoměr.....	17
2.5 PRACOVNÍ PLYNY .....	18
2.6 VAKUOVÉ KOMORY .....	19
2.7 DEPOZIČNÍ MATERIÁLY .....	20
2.7.1 Uhlík.....	20
2.7.2 Hliník .....	21
2.7.3 Zlato.....	22
2.8 SUBSTRÁTY .....	23
<b>3 NAVRŽENÉ POSTUPY</b> .....	<b>24</b>
3.1 PŘÍPRAVA .....	24
3.2 DEPOZICE .....	25
3.2.1 Uhlík.....	25
3.2.2 Hliník .....	26
3.2.3 Zlato.....	26
3.3 STABILIZACE .....	27
<b>4 OVĚŘENÍ NAVRŽENÝCH POSTUPŮ</b> .....	<b>27</b>
4.1 ZÁMĚR.....	27
4.2 POUŽITÁ APARATURA .....	28
4.3 POSTUP .....	28
4.4 ZHODNOCENÍ.....	29
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>31</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>32</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>
I. PŘEHLED MATERIÁLŮ.....	1



## Seznam zkratek a symbolů

BI2	Keramické substráty s interdigitální strukturou
LCD	Liquid crystal display
IPA	Isopropylalkohol - rozpouštědlo na bázi alkoholu
p [mbar]	Jednotka tlaku
p [torr]	Jednotka tlaku (1 torr = 1,333 mbar)
U [V]	Elektrické napětí
I [A]	Elektrický proud
t [s]	Jednotka času
$\varphi$ [°]	Fázový posun
Z [ $\Omega$ ]	Elektrická impedance
t [°C]	Jednotka teploty
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Jednotka objemu

# 1 Úvod

Tenké vrstvy jsou struktury, jejichž tloušťka se pohybuje od desítek nanometrů až po jednotky mikrometrů. U těchto materiálů pozorujeme zajímavé fyzikální vlastnosti, které je velice obtížné dosáhnout pomocí objemových materiálů. Je zřejmé, že tenké vrstvy mají velice široké uplatnění v mnoha průmyslových oborech, jako je například optika (výroba UV filtrů, antireflexních vrstev, ochrana proti poškrábání skel), strojírenství (zlepšení otěruvzdornosti a tvrdosti nástrojů, ochrana proti korozi) a především v elektronice a elektrotechnice, kde tenkovrstvé procesy užíváme při výrobě záznamových médií, polovodičových součástek a čipů, fotovoltaických článků a v mnoha dalších aplikacích.

V dostupné české literatuře se mi nepodařilo najít ucelený a stručný přehled tenkovrstvých procesů zaměřený na elektronické aplikace. Vypracování takového přehledu je předmětem této práce. V práci se zaměřím na vakuové procesy napařování a naprašování, které budou detailně rozebrány v následujících kapitolách. Dále budou popsány požadavky na potřebná zařízení, podmínky a procesy, které je nutné dodržet k vytvoření kvalitních vrstev. Cílem mé práce je poskytnout ucelený soubor informací, použitelný ke studiu této problematiky.

Práci jsem rozčlenil na tři hlavní oddíly. V prvním jsou popsána potřebná zařízení včetně základních principů, na kterých pracují. Jedná se o shrnutí základních teoretických znalostí. Tato kapitola je zpracována formou rešerše z dostupné literatury. Druhý oddíl se přímo zaměřuje na postupy naprašování zlata a napařování uhlíku a hliníku. V této kapitole popisují použití aparatury na základě literatury a vlastních zkušeností z provedených experimentů. Jsou zde zmíněny různé vlastnosti materiálů a z toho plynoucí požadavky na přípravu aparatury, délku expozice a dalších parametrů. V poslední části práce je popsán experiment, kterého jsem se účastnil.

## 2 Přehled vakuových procesů a zařízení

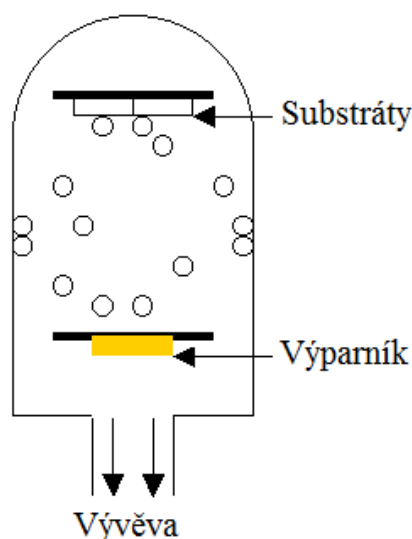
Technologie pro vytváření tenkých vrstev je možné rozdělit do dvou velkých skupin:

**Chemické metody deposice** jsou založeny na chemických reakcích mezi substrátem a plazmatem přiváděných plynů. Pomocí tohoto postupu je možné vytvářet odolné a silné vrstvy. Substrát je však vystaven vysokým teplotám (okolo 1000 °C), což omezuje oblast použití této technologie. Tímto způsobem deposice se dále nebudu zabývat.

**Fyzikální metody deposice** jsou založeny na principu přenosu deponované látky z jejího zdroje na substrát. Tato technologie vytváří tenké a odolné vrstvy. Vzhledem k nízkým teplotám, kterými je substrát zatížen, je tento postup vhodný pro široké spektrum použití. Dále se zaměřím na popis technologií napařování a naprašování, které patří do této skupiny a jsou významné z hlediska elektrotechniky.

### 2.1 Napařování

Pracovní prostor, schematicky znázorněný na obrázku *Obr. 2.1.1*, je odčerpáván vývěvou. Docílíme tím jednak větší čistoty deponovaných vrstev a především snížíme teplotu nutnou k odpaření deponované látky. Tepelná energie může být dodána ve formě odporového ohřevu, laserového paprsku nebo elektronového svazku. Během odpařování deponované látky dochází k jevu nazývanému tenze nasycených par. V případě jeho porušení v místě s nižší teplotou, zde začne napařovaná látka kondenzovat. Tím je zajištěn přenos deponované látky ze zdroje na substrát.

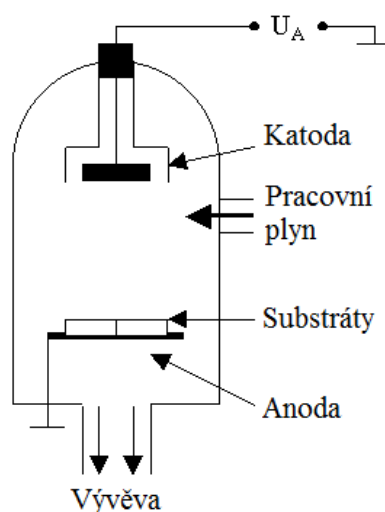


*Obr. 2.1.1* Schematické znázornění procesu napařování [11]

## 2.2 Naprašování

Naprašování začíná opět odčerpáním pracovního prostoru vývěvou, aby se předešlo kontaminaci deponovaných vrstev plyny obsaženými v atmosféře. Následně je do prostoru napuštěn inertní pracovní plyn. Mezi deponovaný materiál umístěný na katodě a substrát umístěný na anodě, se přivede vysoké napětí. Ionty pracovního plynu jsou urychlovány ke katodě, kde svým dopadem vyrazí částice z terče, který je vyroben z deponovaného materiálu. Vyražené částice dopadají na okolní plochy, především substrát, kde se usazují. Schématické uspořádání pracovního prostoru je na obrázku *Obr. 2.2.1*.

**Magnetronové naprašování** je speciálním případem popsané technologie, kdy je terč umístěn v magnetronu. Pole generované magnetronem způsobí prodloužení dráhy elektronů a tím se zvýší pravděpodobnost srážek s atomy pracovního plynu. Výsledkem je vytvoření plazmatu a zvýšení počtu dopadajících iontů na terč, což zvyšuje efektivitu celého procesu.



*Obr. 2.2.1* Schématické znázornění procesu naprašování [11]

Dále ještě existují reaktivní postupy, kdy je v aparatuře přítomen kromě pracovního plynu ještě reaktivní plyn, který reaguje s deponovaným materiálem a vytváří různorodé deponované vrstvy.

Kapitola dále pokračuje přehledem základních znalostí o jednotlivých komponentech aparatury, které je vhodné znát k lepšímu pochopení celé problematiky. Rovněž jsou popsány depoziční materiály, substráty a pracovní plyny, které se při výrobě tenkých vrstev používají.

## 2.3 Vývěvy

Vývěvy jsou zařízení pro odčerpávání plynů z pracovního prostoru aparatury za účelem vytvoření vakua, případně vhodné pracovní atmosféry. Toto je důležité k zajištění kvality a čistoty deponovaných vrstev. V případě nedostatečného vakua by mohlo dojít k nežádoucí reakci substrátu nebo depozičního materiálu se směsí plynů obsažených ve vzduchu. Výběr se provádí s ohledem na požadovaný mezní tlak, čistotu čerpaného prostoru a ekonomické náklady.

Základní dělení vývěv z hlediska funkce:

**Transportní** čerpají plyn přes pracovní prostor do dalšího stupně nebo přímo do atmosféry. Jsou schopné pracovat nepřetržitě a tedy zpracovat velké množství plynu. Tento typ vývěv se dále dělí na mechanické a hybnostní. Mechanické jsou založeny na cyklické změně objemu pracovního prostoru vývěvy. Hybnostní vývěvy předávají molekulám čerpaného plynu rychlostní impuls ve směru čerpání. V závislosti na konstrukci mohou obsahovat pracovní médium, jehož páry znečišťují odčerpávaný prostor.

**Adsorpční** vývěvy čerpaný plyn pohlcují na základě chemických nebo fyzikálních procesů. Pracují v cyklech, jsou vhodné pro vytváření velice vysokého vakua, nedovedou však čerpat trvale velké množství plynu.

**Tab. 2.3-1** Rozdělení vývěv dle principu funkce. [2]

vývěvy	adsorpční	kryokondenzační, kryosorpční, getrová		
	transportní	mechanické	pístové	membránová, Sprenglerova, Toeplerova
			rotační	rotační olejová, rotační rtuťová, Rootsova
hybnostní	vodní, difúzní, molekulární, iontová			

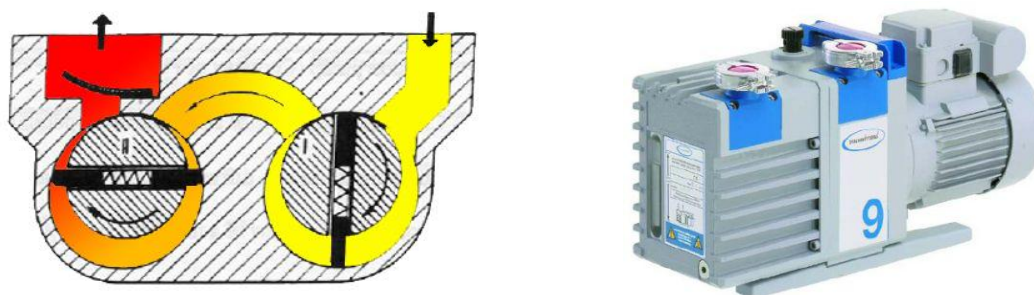
Pro dosažení vysokého vakua, požadovaného pro tenkovrstvé depoziční techniky, je nutné použít soustavu vývěv. Často se užívá kombinace rotační olejové a difúzní vývěvy nebo membránové a turbomolekulární vývěvy. První stupeň čerpá plyn jako spojitě médium (tlak  $10^{-2}$  mbar a více) velkou čerpací rychlostí. Druhý stupeň, čerpající plyn jako jednotlivé molekuly (tlak menší než  $10^{-2}$  mbar), pak dosáhne vyššího vakua. V následujících kapitolách budou jmenované vývěvy blíže popsány.

### 2.3.1 Rotační olejová vývěva

Je složena z excentricky uloženého rotoru, který je opatřen lopatkami. Lopatky jsou na pružinách pro zajištění kvalitního doteku mezi lopatkou a stěnou statoru. Na stěnách statoru je vrstva oleje, který zlepšuje těsnost mezi lopatkami a stěnami statoru, dále slouží jako mazivo a rovněž odvádí vznikající teplo.

V první části pracovního cyklu se otáčením rotoru zvětšuje objem prostoru mezi státorem a rotorem. Dochází k nasávání plynu z čerpaného prostoru. Dalším pootočením rotoru se pracovní prostor vývěvy začne zmenšovat a tím roste tlak plynu. Následně je přes výfukový ventil odveden do dalšího stupně nebo do atmosféry. Během jedné otáčky rotoru proběhnou dva pracovní cykly, jak je vidět na obrázku *Obr. 2.3.1* vlevo, kde je znázorněna dvoustupňová vývěva.

Tento typ vývěvy je v laboratorní i technologické praxi nejrozšířenější. I přes komplikace vznikající možným zamořením čerpaného prostoru parami oleje nebo jiných kondenzátů. Vyznačuje se velkou čerpací rychlostí, která se pohybuje od 38 l/min do 828 l/min, a dlouhodobou spolehlivostí. Na obrázku *Obr. 2.3.1* vpravo je fotografie komerční vývěvy. Mezní tlak, kterého je možno dosáhnout se pohybuje od  $5 \times 10^{-2}$  do  $10^{-4}$  mbar [4].



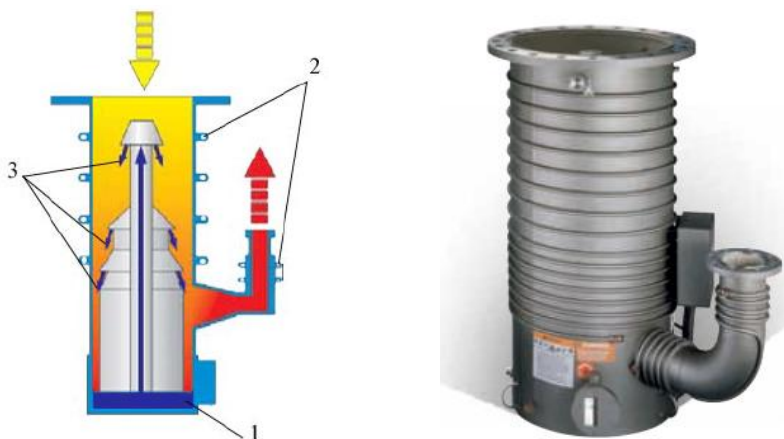
**Obr. 2.3.1** Schéma dvoustupňové rotační olejové vývěvy [2], fotografie rotační olejové [3]

### 2.3.2 Difúzní vývěva

Vývěva je tvořena válcem, na jehož dně je varník vyhříváný elektrickým proudem (1 na Obr.2.3.2 ). Páry pracovního média, většinou oleje, jsou vedeny k tryskám (3) a dále do kondenzačního prostoru vývěvy. Plášť je chlazen vodou (2).

Funkce je založena na vtažení molekul čerpaného plynu do svazku par. Směs je vedena do prostoru, kde olej zkondenzuje a odtéká zpět do varníku. Čerpané molekuly se však nemohou proti proudu par dostat zpět a hromadí se v kondenzačním prostoru. Odtud jsou odvedeny dalším stupněm, přičemž v každém dalším stupni narůstá tlak. Nakonec jsou molekuly plynu odvedeny rotační olejovou vývěvou.

Difúzní vývěvy se uplatňují při vytváření vysokého vakua. Nemohou jej však vytvořit samostatně, potřebují k tomu předvakuum, které zajistí rotační olejová vývěva připojená na výstup. Aby se předešlo kontaminaci čerpaného prostoru parami oleje, zařazují se před vývěvu lapače olejových par. Tato nepříjemná vlastnost je kompenzována jednoduchou konstrukcí a nízkou pořizovací cenou. Na trhu jsou k dostání difúzní vývěvy s čerpací rychlostí 65 l/s až po 12 500 l/s a mezním tlakem  $6,5 \times 10^{-8}$  mbar [4]. Před použitím je nutné počkat na rozehtání oleje, což dle výrobce trvá 7 až 40 minut v závislosti na velikosti vývěvy. Tuto vývěvu není možné používat při atmosférickém tlaku, došlo by k znehodnocení oleje.



Obr. 2.3.1 Schéma difúzní vývěvy[3], fotografie difúzní vývěvy [4]

### 2.3.3 Membránová vývěva

Tato vývěva patří do skupiny pístových vývěv. Funkce je založena na cyklické změně objemu pracovního prostoru pomocí pístu, v tomto případě je však píst nahrazen membránou. Membrána může být vyrobena z chemicky inertního materiálu (teflon), poté je možné čerpat korozivní a chemicky agresivní plyny. Tento druh vývěvy se používá v laboratořích

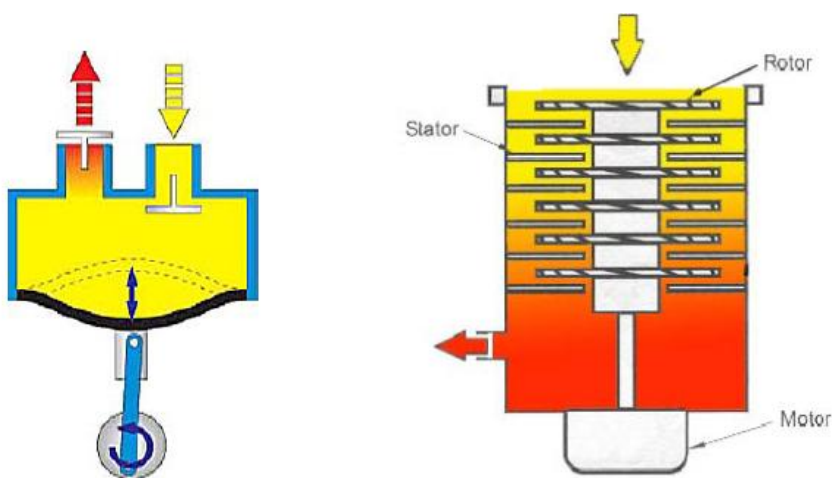
a provozech s požadavky na nízké vakuum, případně jako zdroj předvakua pro další stupně. Nevýhodou je časté opotřebení vstupních a výstupních ventilů, které jsou pro správnou funkci nezbytné a určují mezní tlak. Tato nevýhoda je vyvážena relativně lehkou konstrukcí a nízkou cenou. Schéma membránové vývěvy je na obrázku *Obr. 2.3.2* vlevo. Typická hodnota čerpací rychlosti u této vývěvy je okolo 20 l/s, mezní tlak 4 mbar [4].

### 2.3.4 Turbomolekulární vývěva

Vývěva se skládá ze statorové a rotorové části, obě jsou opatřeny lopatkami, které jsou mezi sebou proloženy. Rotor se otáčí vysokou rychlostí 30 – 90 tisíc otáček za minutu, a proto je uchycen v magnetickém závěsu. Nedochozí tak ke vzniku tření a také je zabráněno kontaminaci čerpaného prostoru parami oleje pro mazání ložisek.

Molekuly čerpaného plynu se vlastním tepelným pohybem dostanou do prostoru první lopatky, kde jim je udělen impulz ve směru otáčení. Přes statorovou lopatku je molekula odražena do prostoru druhé rotorové lopatky a celý proces se několikrát opakuje.

Vývěva dosahuje velice vysokého vakua  $10^{-10}$  mbar a používá se v technologických aparaturách. Čerpací rychlost se pohybuje v rozmezí od 46 l/s do 7 500 l/s [4]. Konstrukce je však náročná a drahá. Zajímavostí u této vývěvy jsou provozní podmínky. Vzhledem k rezonancím, ke kterým dochází během rozbíhání a zastavování vývěvy, je vhodné z hlediska životnosti tuto vývěvu udržovat stále ve vysokých otáčkách. Vývěva se také nesmí používat při atmosférickém tlaku, třením lopatek by vzniklo velké množství tepla, které by vývěvu poškodilo. Schéma vývěvy je na obrázku *Obr. 2.3.3* vpravo



**Obr. 2.3.3** Schéma membránové vývěvy [3], Schéma turbomolekulární vývěvy [3]



## 2.4 Vakuoměry

Vakuoměry se používají k měření tlaku zbylých plynů v aparatuře – určují kvalitu vakua. Vakuová technika pracuje s velkým množstvím tlaků, proto je při výběru vakuometru třeba zohlednit rozsah měřených tlaků, požadovanou přesnost, možné interakce vakuometru s měřeným plynem a samozřejmě cenu.

V oblasti středního vakua ( $1 \text{ mbar} - 10^{-3} \text{ mbar}$ ) se využívají **tepelné vakuoměry**, založené na závislosti tepelné vodivosti plynu a jeho tlaku. Do této skupiny patří Piranniho a termočláňkové vakuoměry.

Pro oblast vysokého vakua ( $10^{-3} \text{ mbar} - 10^{-12} \text{ mbar}$ ) se využívají **ionizační vakuoměry**. Pracují na principu měření elektrického proudu v ionizovaném plynu. Dle způsobu ionizace je dělíme na Penningův, triodový vakuoměr a alfatron.

Obecnou vlastností uvedených vakuoměrů je nutnost kalibrace pro každý měřený plyn. Tato potřeba vyplývá z rozdílných fyzikálních vlastností plynů.

### 2.4.1 Piranniho vakuoměr

Jako senzor se využívá vyhřívané tenké vlákno s vysokou závislostí odporu na teplotě. Mezi vláknem a plynem dochází k přenosu tepla, které odpovídá tlaku měřeného plynu. Tlak se snímá v podobě příkonu, který je nutné dodat pro zajištění konstantní teploty vlákna. Tloušťka vlákna by měla být co nejmenší, aby byla zajištěna dostatečná citlivost pro oblast vyšších tlaků. Na povrchu vlákna se nesmí vytvářet žádné sloučeniny, které by měnily jeho vlastnosti. Většinou se používá platina, která je stabilní a splňuje požadavky na vysokou závislost odporu na teplotě.

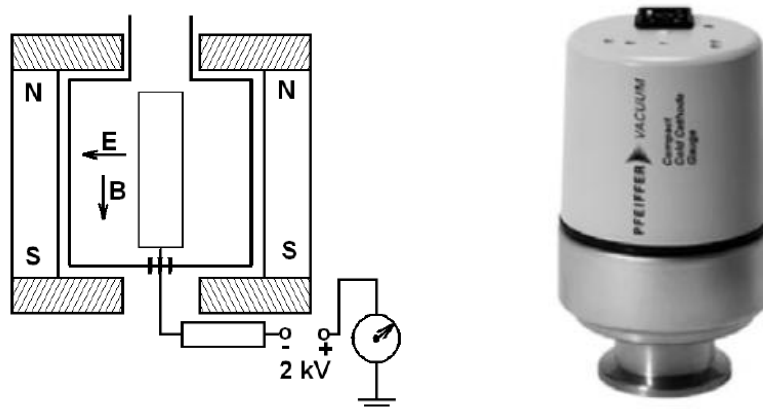
Jedná se o levný, konstrukčně jednoduchý a často využívaný vakuoměr. Přesnost se pohybuje okolo 5 % [4].

### 2.4.2 Penningův vakuoměr

Tlak plynu je měřen v podobě elektrického proudu, který je generován výbojem ionizovaného plynu. Čím větší tlak plynu, tím je větší koncentrace jeho částic a s tím souvisejících možných iontů. Vzhledem k nízkým tlakům je však k vytvoření výboje nutná přítomnost magnetického pole, které je zajištěné silným permanentním magnetem. Dráhy

elektronů se v důsledku působení magnetického pole prodlouží a zvýší se tím pravděpodobnost srážky s neutrální molekulou plynu. Na obrázku *Obr. 2.4.1* je na levé straně k vidění blokové schéma a na pravé komerční realizace.

Jedná se o konstrukčně složitější a finančně nákladnější zařízení. Udávaná přesnost je v závislosti na měřeném plynu okolo 30 % [4].



**Obrázek 2.4.1** Schéma Penningova vakuometru [1]      Fotografie Penningova vakuometru [3]

## 2.5 Pracovní plyny

Pro potřeby vytváření tenkých vrstev je požadováno dokonalé vakuum, to znamená vyčerpání veškeré částice plynů z pracovní aparatury. Tento požadavek však není s ohledem na technické prostředky realizovatelný. Snažíme se mu však co možná nejvíce přiblížit:

Pomocí vývěvy snížíme tlak v čerpaném prostoru na výrobcem definovaný mezní tlak, většinou se používají soustavy vývěv, jak již bylo popsáno v kapitole 2.3.

Pro snížení koncentrace zbylých plynů, které by mohly nepříznivě ovlivnit výsledek depozičních procesů, zavedeme do aparatury inertní plyn. Používají se především argon nebo dusík. Za normálních okolností nereagují s jinými látkami, a tudíž neovlivňují průběh vytváření tenkých vrstev.

Zavedení inertního plynu do aparatury způsobí naředění zbytků původní atmosféry a zvýší tlak. Je tedy možné znovu odčerpat směs inertního a zbytkových plynů. Tímto postupem se sice nesníží výsledný tlak, který je stále limitován použitou vývěvou, dojde však k nahrazení zbytkových plynů inertním. Opakováním tohoto postupu docílíme vhodné atmosféry, která zajistí odpovídající kvalitu výsledných tenkých vrstev.

V případě naprašování jsou požadavky obdobné, nakonec se v aparatuře ponechá inertní plyn o vyšším tlaku, aby mohlo dojít k výboji a přenosu materiálu.

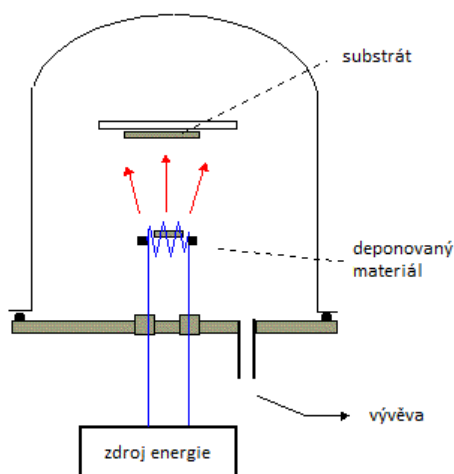
Speciálním případem je reaktivní naprašování, kdy je do aparatury zaveden další plyn, který má cíleně reagovat s naprašovaným materiálem a vytvořit tak speciální strukturu.

## 2.6 Vakuové komory

Vakuová komora je místo, kde dochází k samotné depozici tenkých vrstev. Většinou se jedná o válcovou nádobu, která je uzpůsobena velkým rozdílům tlaků. Vně na ní působí okolní atmosféra, uvnitř je pracovní prostor s vysokým vakuem. Existuje riziko zhroucení nádoby do pracovního prostoru. Aby se tomuto předešlo, konstruuje se v podobě skleněného zvonu s dostatečnou tloušťkou, případně jako ocelový válec. Dále je z principu jasný požadavek na rozebiratelnost vakuové komory. Musí zde být kladen důraz na kvalitní těsnění, aby v místě spojení nedocházelo k netěsnostem.

Uvnitř vakuové komory je umístěn systém elektrod, případně terč, který slouží jako zdroj deponované látky. Podrobné uspořádání je určeno deponovaným materiálem a postupem, který je v komoře aplikován. V následující kapitole 2.7 uvedu příklady pro depoziční materiály uhlík, hliník a zlato. Dále je v komoře přítomen mechanismus pro uchycení substrátů a případné masky. Rovněž zde mohou být umístěny přístroje na měření vakua nebo jiné pro sledování průběhu depozice.

Na obrázku *Obr. 2.6.1* vlevo je schéma malé vakuové komory určené převážně pro experimentální pokusy. Vpravo je k vidění velká průmyslová vakuová komora.



Obrázek 2.6.1 Schéma vakuové komory [5]



Fotografie vakuové komory [6]

Jako zdroje energie se používají řízené spínané stejnosměrné zdroje. V případě napařování, kdy je deponovaná látka odporově zahřáta a vypařena, je požadován velký výstupní proud okolo 150 A při nízkých hodnotách napětí do 10 V. Naopak proces naprašování, kde je třeba ionizovat pracovní plyn, vyžaduje vysoké napětí okolo 3 kV, naopak proud je v řádech desítek mA.

## 2.7 Depoziční materiály

Pomocí technologií napařování a naprašování je možné nanášet velké množství různých materiálů. Pro procesy napařování jsou vhodné materiály s nízkou teplotou varu – dají se dobře odpařovat, naopak materiály, u kterých je teplota varu příliš vysoká, nebo se jedná o dielektrické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ) je vhodná technologie naprašování. Pro potřeby a zaměření mé práce podrobněji popíši uhlík, hliník a zlato. U ostatních materiálů jsou postupy obdobné, až na úpravy odpařovacích tělísek s ohledem na teploty a fyzikální vlastnosti daných látek. Základní přehled je uveden v příloze I. -Přehled materiálů.

### 2.7.1 Uhlík

Uhlík je na naší planetě velice hojně rozšířen a i jeho využití v elektrotechnice je široké. Používá se mimo jiné k napařování odporových vrstev a hlavně v poslední době roste jeho význam spolu s objevy na poli nanotechnologií. Pro potřeby napařování se uhlík připravuje do podoby tyčinek různé délky a tloušťky.

Teplota varu uhlíku je při standardním atmosférickém tlaku 4027 °C. [6] Během procesu napařování je však v aparatuře vysoké vakuum, které znatelně sníží potřebnou teplotu. Potřebná tepelná energie je dodána formou odporového ohřevu. Tyčinky jsou v aparatuře připevněny mezi elektrody. Pomocí pružiny je zajištěn jejich pevný dotek. Místo styku obou tyčinek se upravuje ořezáním jedné z tyčinek do hrotu. Procházející elektrický proud způsobuje zahřívání uhlíku a ten je následně odpařován z místa styku. Ukázka uhlíkových tyčinek je na obrázku *Obr. 2.7.1*.



**Obrázek 2.7.1** Uhlíkové tyčinky určené k napařování [7]

## 2.7.2 Hliník

Hliník je pro svoji dobrou elektrickou vodivost v elektrotechnice hojně užívaný kov. Pomocí technologie napařování je možné vytvářet průhledné vodivé elektrody, které mají široké uplatnění ve výrobě LCD panelů. Rovněž se používá pro vytváření vodivých spojení na křemíkových čípech. V technologii napařování se používá ve formě tenkého drátku.

Teplota varu hliníku při standardním atmosférickém tlaku je 2 519 °C. [6] Potřebné teplo se opět dodává formou odporového ohřevu. V tomto případě je však použita wolframová spirála, která funguje jako topný element. Schématický obrázek na *Obr. 2.7.2* vlevo. Z hliníkového drátku je ustřižen požadovaný kus, který je následně zavěšen na wolframové vlákno, jak je patrné z obrázku *Obr. 2.7.2* vpravo. Roztavený hliník v důsledku adheze obalí wolframové vlákno a následně se odpaří.

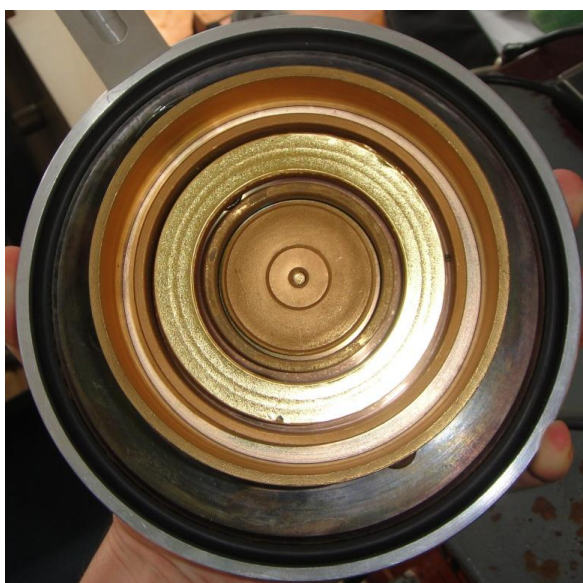


Obrázek 2.7.2 schématické znázornění vlákna [8] ukázka umístění hliníku na vlákno

### 2.7.3 Zlato

Zlato je v elektrotechnice často užívaný kov. Pro svojí vynikající elektrickou vodivost a chemickou stálost má velice široké uplatnění. Požívá se jako vodič na křemíkových čípech a často se s ním setkáváme na kontaktních plochách. V technologii naprašování ho najdeme v podobě prstencového terče umístěného v magnetronu, jak je vidět na obrázku *Obr. 2.7.3*.

Atomy zlata jsou vyráženy z terče a dopadají na substrát, který je umístěn pod ním. Vyražení je způsobeno ionty pracovního plynu, které získaly svojí energii od magnetronu, kde je terč umístěn.



Obrázek 2.7.3 magnetron se zlatým terčem

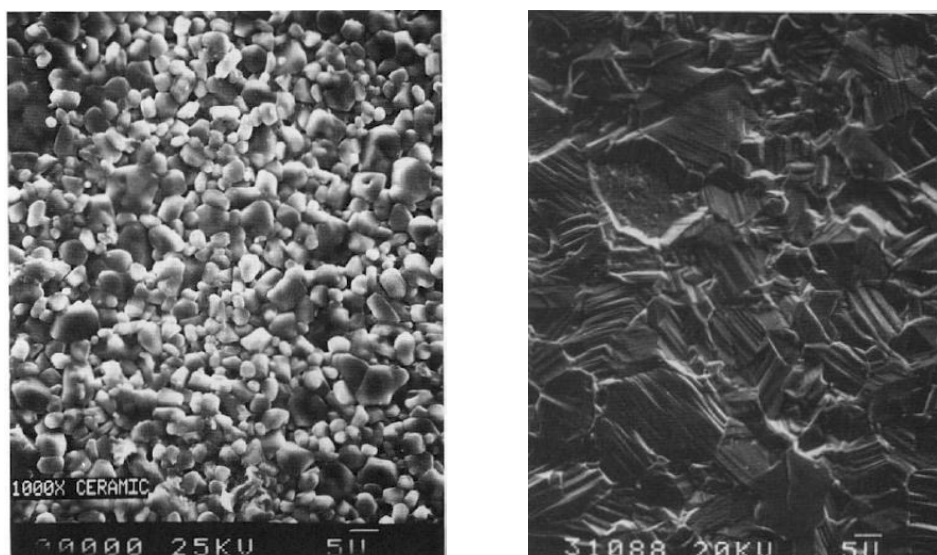
## 2.8 Substráty

Pro dobré výsledky tenkovrstvých procesů je volba a příprava substrátů velice důležitá. Nanosená vrstva kopíruje povrch substrátu, rovněž její přilnavost k podkladu je ovlivněna drsností a afinitou k substrátu a jeho případným znečištěním. Před depozicí je tedy vhodné substrát očistit, vyleštit nebo zdrsňit, s ohledem na požadovaný výstup.

Pro **kovové** substráty je typická tvorba oxidů na povrchu materiálu. Je třeba zvážit u každé aplikace, zdali je taková vrstva nežádoucí a může nepříznivě ovlivnit výsledné vlastnosti. Pak je nutné zvolit vhodný postup na odstranění vrstvy oxidů. Během výroby kovových materiálů se na ně často nanáší ochranný olej, který má tvorbě oxidů zabránit. V takovém případě nastává problém s kontaminací deponovaných vrstev nechtěnými příměsi a je nezbytné substrát řádně očistit.

**Skleněné a keramické** substráty jsou tvořeny jako vícesložkové pevné látky a jejich povrch může být pórovitý. Do těchto pórů mohou být absorbovány jiné látky, případně vodní páry, které rovněž nepříznivě ovlivňují proces depozice. Materiály určené k depozici by měly být monitorovány od výroby, po celou dobu skladování, až po jejich použití.

Na obrázku *Obr. 2.8.1.* vlevo je k vidění povrch korundové keramiky, která se často využívá v mikroelektronice. Na pravé straně je fotografie povrchu kovaru, který byl chemicky zdrsňen pro lepší přilnavost deponovaných vrstev.



**Obrázek 2.8.1** povrch korundové keramiky [8] chemicky zdrsňený kovar [8]

### 3 Navržené postupy

Základním požadavkem na tenkovrstvé procesy je jejich reprodukovatelnost, možnost se na ně při aplikacích spolehnout a komerčně je využít. Za tímto účelem je vhodné stanovit postupy, při jejichž dodržení lze očekávat obdobné výsledky opakované depozice. Dále popisují obecné postupy pro nanášení tenkých vrstev uhlíku, hliníku a zlata, přizpůsobené pro použití na katedrální aparatuře. Seznámil jsem se s nimi během experimentů a z literatury. Detaily jsou závislé na konkrétní použité aparatuře, vývěvách a požadavcích na výsledné vrstvy.

#### 3.1 Příprava

Příprava substrátů na depozici začíná očištěním od nečistot a mastnoty pomocí ultrazvuku. Při tomto druhu čištění se využívá jevu nazývaného kavitace. Ultrazvukové vlny vytvářejí mikroskopické bublinky v čistícím médiu, které vzápětí implodují a uvolněná energie strhává nečistoty z povrchu čištěného předmětu. Zajistíme tím dobrou přilnavost nanášené látky na substrát. Následně je nutné substrát řádně usušit a nanést na něj požadovanou masku. Další možností na zlepšení je provedení desorpce substrátu tím, že ho za sníženého tlaku zahřejeme. Tím se z jeho povrchu uvolní absorbované plyny a nedojde tak k pozdější kontaminaci aparatury a nanášených vrstev. Po vyčištění substrátu jej přemístíme do vakuové komory a řádně upevníme.

Vakuovou komoru je před depozicí rovněž nutné řádně očistit. Využívá se k tomu roztok demineralizované vody a isopropylalkoholu (zkráceně označováno jako IPA). Namočíme ubrousek do roztoku a otřeme všechny dostupné plochy, na kterých by se mohly usazovat nečistoty. Dále je velice důležité očistit těsnění a styčné plochy vakuové komory. Před uzavřením a zahájením čerpání pracovního prostoru nanese na těsnění vakuový tuk. Omezíme tak možné netěsnosti a docílíme vyššího vakua v pracovním prostoru.

Jsou-li v aparatuře přítomné ventily, připojíme k nim kompresor a zkontrolujeme vedení stlačeného vzduchu.

Posledním nezbytným úkonem před samotnou depozicí je vyčerpání pracovního prostoru aparatury vývěvou. Zde je nutné respektovat konkrétní požadavky na provoz zvoleného typu vývěvy. Pro často používané spojení rotační olejové vývěvy a difuzní vývěvy se v první fázi



zapne rotační olejová vývěva. Pracovní prostor čerpá sama, difúzní vývěva je oddělena, nesmí se do ní dostat vzduch, aby nedošlo k znehodnocení oleje. Během sledování poklesu tlaku v pracovním prostoru, je připraven okruh pro chladicí vodu. Rovněž je vhodné zapnout vyhřívání oleje, aby byla vývěva připravena. Po ustálení tlaku v pracovním prostoru, dále se již nesnižuje – rotační olejová vývěva není schopná dále čerpat, zařadíme do soustavy difúzní vývěvu. V prvním kroku se přepnou ventily tak, aby rotační vývěva čerpala z difúzní a vytvořila potřebné předvakuum. Následně je difúzní vývěva připojena k pracovnímu prostoru a začne jej čerpat. V této konfiguraci vyčerpáme pracovní prostor na požadovaný tlak, omezený možnostmi difúzní vývěvy. Následně můžeme přikročit k depozici.

Po dokončení depozice je nutné vývěvy odpojit ve stejném sledu. Napřed se difúzní vývěva oddělí od pracovního prostoru a začneme ji chladit. Teprve poté je možné otevřít pracovní prostor aparatury.

## 3.2 Depozice

Postup se pro jednotlivé materiály liší, podrobnosti budou upřesněny dále.

### 3.2.1 Uhlík

V případě depozice uhlíku je k aparatuře připojena pouze rotační olejová vývěva. Pro dosažení lepšího pracovního prostředí se provádí čerpání v cyklech s použitím argonu. V prvním kroku je aparatura vyčerpána. Následně je do pracovního prostoru napuštěn inertní plyn argon, který zbylé plyny naředí a je možné dále čerpat. Konečný tlak v aparatuře je  $4 \times 10^{-2}$  mbar.

Uhlíkové tyčinky určené k napaření se připevní do elektrod umístěných v horní části pracovního prostoru, substráty se umístí pod soustavu elektrod.

Depozice se řídí především časem, po který je zapnutý zdroj energie. Ovlivňování je také možné pomocí změny proudu a napětí, výsledný efekt však slouží spíše k přizpůsobení aparatury pro daný typ napařovaného materiálu. Doba procesu nanášení uhlíkových vrstev se pohybuje v jednotkách desítek vteřin.

### 3.2.2 Hliník

Pro potřeby napařování hliníku se používá soustava rotační olejové a difúzní vývěvy, jak bylo popsáno v kapitole 3.1 Příprava. Tímto postupem lze dosáhnout tlaku  $4 \times 10^{-4}$  mbar.

Wolframová spirála se připevní mezi elektrody ve spodní části pracovního prostoru. Substráty jsou umístěny nad ní v horní části.

Množství napařeného hliníku se ovlivňuje především dávkováním hliníkového drátku, který je zavěšen na wolframovou spirálu. Ta je následně zahřívána procházejícím elektrickým proudem, hliník se roztaví a následně odpaří. Přichází v úvahu řízení změnou velikosti proudu a napětí, ale vzhledem k tomu, že je třeba dosáhnout teploty pro odpaření hliníku, je tato regulace velice omezená a spíše ovlivňuje celkovou dobu depozice. Dále by bylo možné řídit proces na základě času, nicméně je obtížné stanovit, za jak dlouho se vypaří dané množství hliníku. Délka depozice je přibližně do dvou minut, v závislosti na nastavení velikosti napětí a procházejícího proudu.

### 3.2.3 Zlato

Aparatura pro depozici zlata využívá pouze rotační olejovou vývěvu. Podobně jako u depozice uhlíku se čerpá v cyklech s pomocí inertního plynu argonu. Rozdíl je v tom, že na konci čerpání se do pracovního prostoru napustí argon o tlaku 0,13 mbar. Po dodání energie magnetronem bude sloužit jako zdroj iontů, které vyrazí z terče atomy zlata.

Magnetron se zlatým terčem je umístěn v horní části pracovního prostoru, substráty se umisťují do spodní části pracovního prostoru na anodu.

Proces napařování se ovládá délkou depozice, v závislosti na požadované tloušťce se doba pohybuje v minutách.

### 3.3 Stabilizace

Nadeponované vrstvy je vhodné náležitě ošetřit, aby se zajistila jejich dlouhodobá stabilita. Například hliník reaguje s atmosférickým kyslíkem a pokrývá se vrstvou oxidu. V případě, že je tato vrstva oxidu nežádoucí, je třeba substrát chemicky ošetřit. Další možnou příčinou změn vlastností tenkých vrstev může být vnitřní pnutí materiálu. To se dá odstranit vystárnutím v klimatické komoře za zvýšené teploty. Tento postup je zvláště žádoucí v případě součástek pro elektrotechniku, na které jsou kladeny vysoké požadavky na stálost parametrů.

## 4 Ověření navržených postupů

V průběhu přípravy práce se naskytla příležitost účastnit se experimentů na katedrální aparatuře. V praxi si vyzkoušet popisované postupy a seznámit se s konkrétními přístroji. Následuje popis jednoho z experimentů.

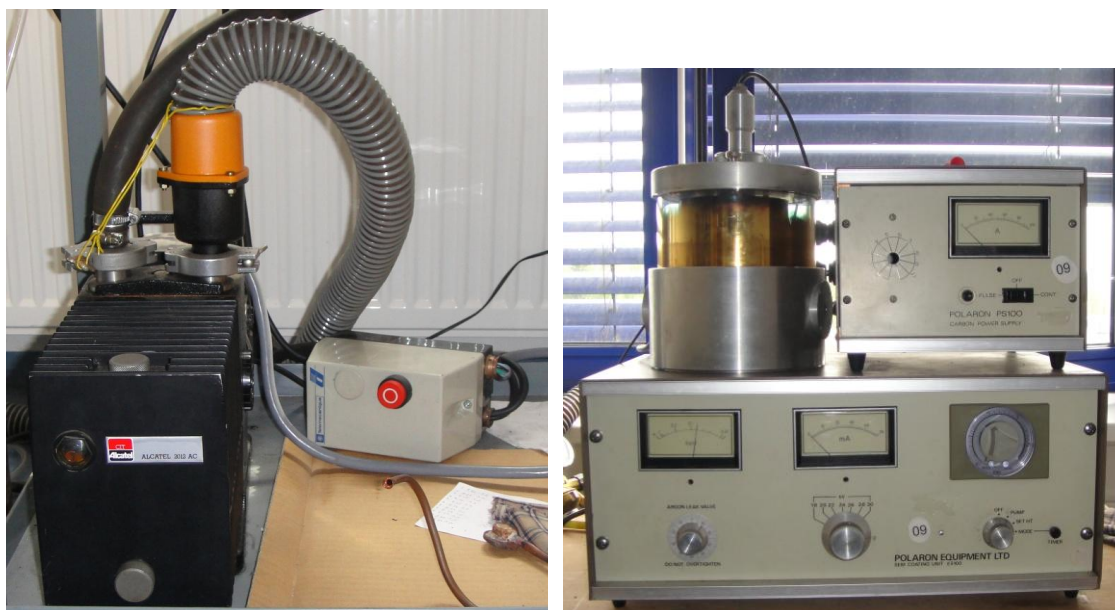
### 4.1 Záměr

Cílem experimentu je porovnání vlastností uhlíkových tyčinek od firmy Karbontechnik s originálními, dodávanými výrobcem aparatury. Při výrobě neoriginálních tyčinek nesoucích označení KTE-26 a KTI-10 je použita odlišná technologie výroby.

Jako substrát jsou použity keramické substráty s interdigitální strukturou BI2 s roztečí 50  $\mu\text{m}$ . Budou sledovány změny elektrických vlastností substrátů po depozici.

## 4.2 Použitá aparatura

Napařování uhlíkových vrstev probíhalo na aparatuře POLARON E5100, na obrázku *Obr. 4.2.1.* vlevo. Aparatura byla odčerpávána dvoustupňovou olejovou rotační vývěvou ALCATEL 2012 AC a napájena zdrojem GALFONT.



**Obrázek 4.2.1** vývěva ALCATEL 2012 AC napařovací aparatura POLARON E5100

## 4.3 Postup

Substráty byly nejprve očištěny v ultrazvukové lázni. Po usušení byly změřeny elektrické parametry a nanášena maska v podobě lepicí pásky přes oblast kontaktů.

Uhlíkové tyčinky byly připevněny do elektrod a substráty vloženy do pracovní komory. Před uzavřením pracovního prostoru bylo ještě očištěno těsnění a pak již začalo čerpání pomocí rotační vývěvy. Po ustálení tlaku byl do pracovního prostoru napuštěn argon. Tím došlo k naředění zbytkových plynů a vývěva mohla znovu odčerpávat, až se dostala na konečný tlak  $4 \times 10^{-2}$  mbaru, při kterém probíhala depozice.

Na napájecím zdroji bylo nastaveno napětí 6,5 V a proud na 150 A. Depozice probíhala 20 sekund. Pak bylo nezbytné počkat 10 minut, než se vrstvy ochladily a stabilizovaly, následně byla komora zavzdušněna, otevřena a vzorky vyměněny. Po opětovném vyčerpání aparatury probíhala druhá depozice 50 sekund. Po vyjmutí z napařovací komory byly znovu změřeny elektrické parametry substrátů.

#### 4.4 Zhodnocení

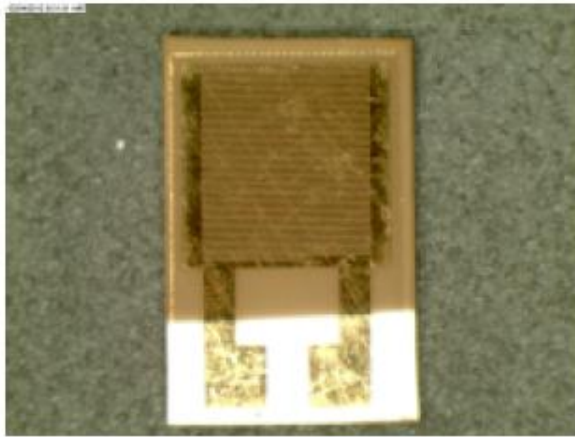
Z naměřených výsledků zobrazených v tabulce *Tab. 4.4-1*, jasně vyplývá značné snížení elektrického odporu vlivem nanesení vodivé uhlíkové vrstvy. Dle předpokladů je znatelná úměra mezi délkou napařování a tloušťkou - odporem výsledné vrstvy. Za povšimnutí rovněž stojí změna charakteru substrátu z kapacitního na odporový.

Dále bylo zajímavé sledovat vliv umístění substrátů. Substráty umístěné přímo pod soustavou elektrod, byly dle mého subjektivního pozorování tmavší – tudíž na nich byla větší napařená vrstva. Naopak substráty, které byly uloženy blíže ke kraji pracovní komory, měly světlejší odstín. Toto pozorování svědčí o nerovnoměrném napařování. Pro zajištění reprodukovatelnosti je vhodné umísťovat substráty na pevně dané místo.

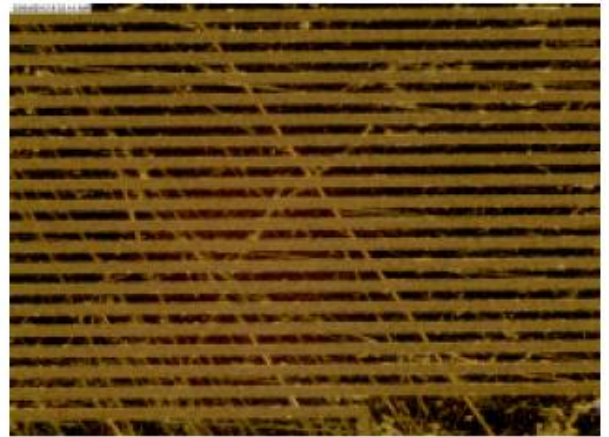
Na obrázcích *Obr. 4.4.1*. a *Obr. 4.4.2*. jsou substráty s napařenou vrstvou uhlíku. Je jasně patrný rozdíl v délce expozice a výsledné tloušťce vrstvy. Na pravé straně jsou detaily povrchu substrátů.

**Tab. 4.4-1** elektrické vlastnosti substrátů.[9]

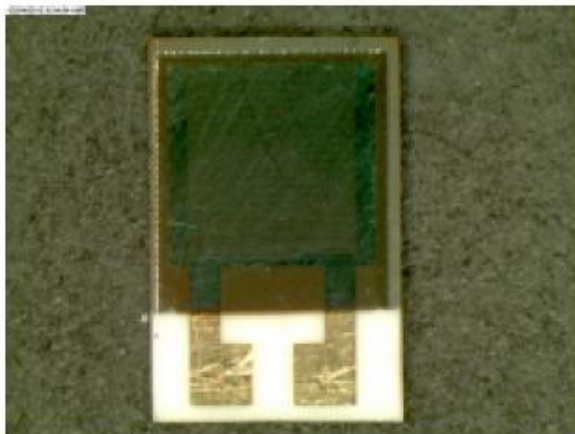
č.vzorku	$Z_{poč}[M\Omega]$	$\varphi_{poč}[^\circ]$	$Z[k\Omega]$	$\varphi[^\circ]$	$R[k\Omega]$	$t[s]$	Pozn
1CO I N	21,45	-89,6	12,3	-0,5	12,4	20	original
1CO II N	22,26	-89,9	10,7	-0,36	10,8	20	original
2CO I	22,35	-88,2	0,42	0	0,43	50	original
2CO II	21,9	-90	0,33	0,01	0,33	50	original
1CK I	22,7	-89,8	21,4	-0,6	21,5	20	KTE-26
1CK II	22,1	-89,7	15,3	-0,2	15,4	20	KTE-26
2CK I	21,7	-89,6	0,66	0	0,66	50	KTE-26
2CK II	21,7	-89,9	0,78	0	0,78	50	KTE-26
1EK I	21,7	-89,8	5,3	-0,06	5,3	20	KTI-10
1EK II	22,2	-89,9	4,7	-0,03	4,7	20	KTI-10
2EK I	22,3	-89,7	3,9	-0,025	3,9	50	KTI-10
2EK II	21,5	-89,8	2,7	-0,02	2,7	50	KTI-10



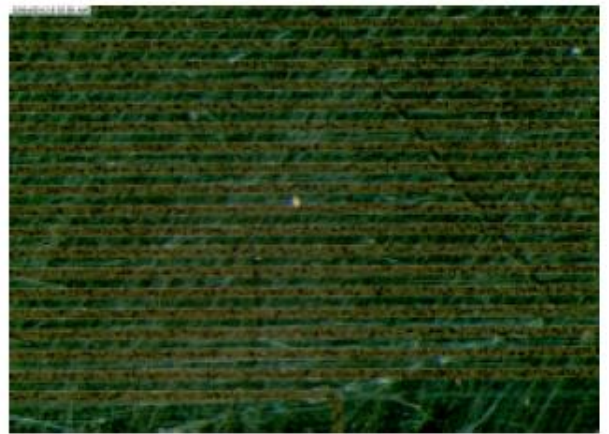
**Obrázek 4.4.1** vzorek 1CKII – depozice 20s



detail povrchu [9]



**Obrázek 4.4.2** vzorek 2CKII - depozice 50s



detail povrchu [9]

## 5 Závěr

V souladu se zadáním jsem prostudoval dostupnou literaturu zabývající se tenkovrstvými procesy. Zaměřil jsem se na procesy napařování uhlíku a hliníku, dále na napařování zlata s důrazem na použití v elektrotechnice. Formou rešerše jsem v první kapitole popsal samotné postupy včetně potřebných zařízení a základních principů, na kterých pracují. Snažil jsem se o popsání nejpoužívanějších typů se širokým záběrem využití.

Získané vědomosti jsem dále využil při stanovení postupů pro přípravu substrátů a depozici tenkých vrstev. Postupy jsou navrženy s ohledem na možnosti využití na katedrální aparatuře, dále obsahují obecné aplikovatelné poznámky pro zlepšení výsledků depozice a zajištění dlouhodobé stability deponovaných vrstev.

Navržené postupy byly experimentálně vyzkoušeny a ověřeny ve čtvrté kapitole. Je zde popsán průběh a výsledek napařování uhlíkových vrstev. Bylo velice zajímavé sledovat rozdíly mezi teoretickými předpoklady a skutečnými výsledky. Zmínil bych nerovnoměrné nanesení vrstev v závislosti na umístění substrátu a neobvyklé zbarvení zlatých vrstev, které bylo zřejmě způsobené nedokonalostí pracovní atmosféry, případně nedostatečným očištěným substrátu. Oba výše uvedené problémy by mohly být předmětem dalšího zkoumání za účelem zdokonalení depozice.

## Použitá literatura

- [1] BOUŠEK, J. *Vakuová technika*. FEKT Vysokého učení technického v Brně, Brno, 2005
- [2] ERBEN, M. *Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií*. FCHT Univerzita Pardubice, Pardubice 2008
- [3] Technické specifikace výrobků firmy Maneko [online]. 2007 [citováno dne 2012-03-07]. maneko.cz. Dostupné z WWW <<http://www.maneko.cz/>>.
- [4] Technické specifikace výrobků firmy Agilent [online]. 2011 [citováno dne 2012-04-20]. agilent-vakuum.cz. Dostupné z WWW <<http://www.agilent-vakuum.cz/>>.
- [5] Internetová prezentace ICMM [online]. 2011 [citováno dne 2012-05-22]. icmm.csic.es. Dostupné z WWW <<http://www.icmm.csic.es/>>.
- [6] Internetová encyklopedie Wikipedie [online]. 2004 [citováno dne 2012-05-22]. en.wikipedia.org. Dostupné z WWW <<http://en.wikipedia.org/>>
- [7] Technické specifikace výrobků firmy Quorum Technologies [online]. 2012 [citováno dne 2012-05-22]. quorumtech.com. Dostupné z WWW <<http://www.quorumtech.com/>>
- [8] MATTOX, D. M. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. Noyes Publications, Westwood, New Jersey, USA 1998, ISBN: 0-8155-1422-0
- [9] HAMÁČEK, A.; ŘEBOUN, J.; ŠTULÍK, J.; PRET, S. *Depozice uhlíkových vrstev na IDE struktury – Testování uhlíkových hrotů od firmy Karbontech – Depozice tenkých vrstev*. FEL Západočeské univerzity v Plzni, Plzeň, 2012
- [10] Internetová prezentace Kurt J. Lesker Company [online]. 2012 [citováno dne 2012-06-05]. lesker.com. Dostupné z WWW <<http://www.lesker.com/>>.
- [11] ŠPANIHEL, F. *Způsoby vytváření tenkých vrstev vodivých polymerů*. FEL Západočeské univerzity v Plzni, Plzeň, 2011



## Přílohy

## I. Přehled materiálů

Přehled materiálů a jejich vlastností s ohledem na nanášení pomocí napařování. [10].

## Key of Symbols

\* influenced by composition \*\* Cr-plated rod or strip \*\*\*All metals alumina coated Ex = excellent G = good F = fair P = poor S = sublimes D = decomposes C = carbon Gr = graphite  
Q = quartz Incl = Inconel VC = vitreous carbon SS = stainless steel

Material	Formula / Symbol	MP (°C)	Sublime / Decompose	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	Temp. (°C) for Given Vap. Press. (Torr)				Thermal Sources			Comments
					10-8	10-6	10-4	10-2	Boat	Coil	Basket	
Aluminum	Al	660		2.70	677	821	1010	1010	TiB <sub>2</sub> W	W	W	Alloys and wets. Stranded W is best.
Aluminum Antimonide	AlSb	1080		4.30	-	-	-	-	-	-	-	-
Aluminum, 2% Copper	Al2%Cu	640		2.82	-	-	-	-	-	-	-	Wire feed and flash. Difficult from dual sources.
Aluminum, 2% Silicon	Al2%Si	640		2.69	-	-	1010	-	-	-	-	Wire feed and flash. Difficult from dual sources.
Antimony	Sb	630	S	6.68	279	345	425	425	Mo,*** Ta***	Mo, Ta	Mo, Ta	Toxic. Evaporates well.
Barium	Ba	725		3.51	545	627	735	735	W, Ta, Mo	W	W	Wets without alloying reacts with ceramics.
Beryllium	Be	1278		1.85	710	878	1000	1000	W, Ta	W	W	Wets W/Mo/Ta. Powder and oxides toxic. Evaporates easily.
Bismuth	Bi	271		9.80	330	410	520	520	W, Mo, Ta	W	W	Toxic vapor. Resistivity high. No shorting of baskets.
Boron	B	2300		2.34	1278	1548	1797	1797	C	-	-	Explodes with rapid cooling. Forms carbide with container.
Cadmium	Cd	321		8.64	64	120	180	180	W, Mo, Ta	-	W, Mo, Ta	Bad for vacuum systems. Low sticking coefficient.
Cadmium Antimonide	CdSb <sub>2</sub>	456		6.92	-	-	-	-	-	-	-	-
Calcium	Ca	839	S	1.54	272	357	459	459	W	W	W	Corrodes in air.
Carbon	C	~3652	S	1.8-2.1	1657	1867	2137	2137	-	-	-	E-beam preferred. Arc evaporation. Poor film adhesion.
Cerium	Ce	798		-6.70	970	1150	1380	1380	W, Ta	W	W, Ta	-
Cesium	Cs	28		1.88	-16	22	80	80	SS	-	-	-
Chiolite	NasAlF <sub>14</sub>	-		2.90	-	-	~800	~800	Mo, W	-	-	n = 1.33
Chromium	Cr	1857	S	7.20	837	977	1157	1157	**	W	W	Films very adherent. High rates possible.
Cobalt	Co	1495		8.90	850	990	1200	1200	W, Nb	-	W	Alloys with refractory metals.
Copper	Cu	1083		8.92	727	857	1017	1017	Mo	W	W	Adhesion poor. Use interlayer (Cr). Evaporates using any source material.
Dysprosium	Dy	1412		8.55	625	750	900	900	Ta	-	-	-
Erbium	Er	1529	S	9.07	650	775	930	930	W, Ta	-	-	-

Europium	Eu	822	S	5.24	280	360	480	W, Ta	-	-	Low tantalum solubility.
Gadolinium	Gd	1313		7.90	760	900	1175	Ta	-	-	High tantalum solubility.
Gallium	Ga	30		5.90	619	742	907	-	-	-	Alloys with refractory metals. Use E-beam gun.
Germanium	Ge	937		5.35	812	957	1167	W, C, Ta	-	-	Excellent films from E-beam guns.
Gold	Au	1064		19.32	807	947	1132	W	W	W*** Mo***	DC, RF, Films soft, not very adherent.
Hafnium	Hf	2227		13.31	2160	2250	3090	-	-	-	-
Holmium	Ho	1474		8.80	650	770	950	W, Ta	W	W	-
Inconel	Ni/Cr/Fe	1425		8.50	-	-	-	W	W	W	Use fine wire wrapped on tungsten. Low rate required for smooth films.
Indium	In	157		7.30	487	597	742	W, Mo	-	W	Wets tungsten and copper. Use molybdenum liner.
Iridium	Ir	2410		22.42	1850	2080	2380	-	-	-	-
Iron	Fe	1535		7.86	858	998	1180	W	W	W	Attacks tungsten. Films hard, smooth. Preheat gently to outgas.
Kanthal	Fe/Cr/Al	-		7.10	-	-	-	W	W	W	-
Lanthanum	La	921		6.15	990	1212	1388	W, Ta	-	-	Films will burn in air if scraped.
Lead	Pb	328		11.34	342	427	497	W, Mo	W	W, Ta	Toxic.
Lithium	Li	181		0.53	227	307	407	Ta, SS	-	-	Metal reacts quickly in air.
Lutetium	Lu	1663		9.84	-	-	1300	Ta	-	-	-
Magnesium	Mg	649	S	1.74	185	247	327	W, Mo, Ta, Cb	W	W	Extremely high rates possible.
Manganese	Mn	1244	S	7.20	507	572	647	W, Ta, Mo	W	W	-
Mercury	Hg	-39		13.55	-68	-42	-6	-	-	-	-
Molybdenum	Mo	2610		10.20	1592	1822	2117	-	-	-	Films smooth, hard. Careful degas required.
Neodymium	Nd	1021		7.01	731	871	1062	Ta	-	-	Low tantalum solubility.
Nichrome IV	Ni/Cr	1395		8.50	847	987	1217	**	W	W, Ta	Alloys with refractory metals.
Nickel	Ni	1455		8.90	927	1072	1262	W	W	W	Alloys with refractory metals. Forms smooth adherent films.
Niobium	Nb	2468		8.57	1728	1977	2287	W	-	-	Attacks tungsten source. n = 1.80
Niobium-Tin	Nb3Sn	-		-	-	-	-	-	-	-	Co-evaporate from two sources.
Osmium	Os	2700		22.48	2170	2430	2760	-	-	-	-
Palladium	Pd	1554	S	12.02	842	992	1192	W	W	W	Alloys with refractory metals. Rapid evaporation suggested.
Parylene	C6H8	300-400		1.10	-	-	-	-	-	-	Vapor-depositable plastic.
Permalloy	Ni/Fe	1395		8.70	947	1047	1307	W	-	-	F, Film low in nickel.
Phosphorus	P	44.1		1.82	327	361	402	-	-	-	Material reacts violently in air. n = 2.14
Platinum	Pt	1772		21.45	1292	1492	1747	W	W	W	Alloys with metals. Films soft, poor adhesion.
Plutonium	Pu	641		19.84	-	-	-	W	-	-	Toxic, radioactive.
Polonium	Po	254		9.40	117	170	244	-	-	-	Radioactive.
Potassium	K	63		0.86	23	60	125	Mo	-	-	Metal reacts rapidly in air. Preheat gently to outgas.
Praseodymium	Pr	931		6.77	800	950	1150	Ta	-	-	-
Rhenium	Re	3180		20.53	1928	2207	2571	-	-	-	Fine wire will self-evaporate.
Rhodium	Rh	1966		12.40	1277	1472	1707	W	W	W	E-beam gun preferred.

Rubidium	Rb	39		1.48	-3	37	111	-	-	-	-	-	-
Ruthenium	Ru	2310		12.30	1780	1990	2260	W	-	-	-	-	-
Samarium	Sm	1074		7.52	373	460	573	Ta	-	-	-	-	-
Scandium	Sc	1541		2.99	714	837	1002	W	-	-	-	-	-
Silicon	Si	1410		2.32	992	1147	1337	W, Ta	-	-	-	-	-
Silver	Ag	962		10.50	847	958	1105	W	Mo	Ta, Mo	-	-	-
Sodium	Na	98		0.97	74	124	192	Ta, SS	-	-	-	-	-
Strontium	Sr	769		2.60	239	309	403	W, Ta, Mo	W	W	-	-	-
Superalloy	Ni/Fe/Mo	1410		8.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tantalum	Ta	2996		16.60	1960	2240	2590	-	-	-	-	-	-
Technetium	Tc	2200		11.50	1570	1800	2090	-	-	-	-	-	-
Teflon	PTFE	330		2.90	-	-	-	W	-	-	-	-	-
Tellurium	Te	452		6.25	157	207	277	W, Ta	W	W, Ta	-	-	-
Terbium	Tb	1356		8.23	800	950	1150	Ta	-	-	-	-	-
Thallium	Tl	304		11.85	280	360	470	W, Ta	-	W	-	-	-
Thorium	Th	1875		11.70	1430	1660	1925	W, Ta, Mo	W	W	-	-	-
Thulium	Tm	1545		9.32	461	554	680	Ta	-	-	-	-	-
Tin	Sn	232	S	7.28	682	807	997	Mo	W	W	-	-	-
Titanium	Ti	1660		4.50	1067	1235	1453	W	-	-	-	-	-
Tungsten	W	3410		19.35	2117	2407	2757	-	-	-	-	-	-
Uranium	U	1132		19.05	1132	1327	1582	Mo, W	W	W	-	-	-
Vanadium	V	1890		5.96	1162	1332	1547	W, Mo	-	-	-	-	-
Ytterbium	Yb	819		6.96	520	590	690	Ta	-	-	-	-	-
Yttrium	Y	1522	S	4.47	830	973	1157	W, Ta	W	W	-	-	-
Zinc	Zn	420		7.14	127	177	250	Mo, W, Ta	W	W	-	-	-
Zinc Antimonide	Zn <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>	570		6.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zirconium	Zr	1852		6.49	1477	1702	1987	W	-	-	-	-	-
Zirconium Silicide	ZrSi <sub>2</sub>	1700		4.88	-	-	-	-	-	-	-	-	-