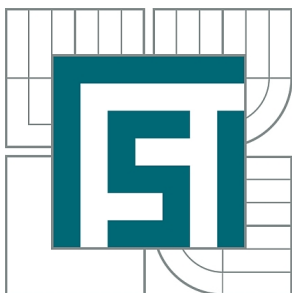


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

STUDIUM MOLEKULÁRNÍCH SVAZKŮ ORGANICKÝCH MATERIÁLŮ

STUDIES OF MOLECULAR BEAMS OF ORGANIC MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAROSLAV MANIŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JINDŘICH MACH, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jaroslav Maniš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901R043)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Studium molekulárních svazků organických materiálů

v anglickém jazyce:

Studies of molecular beams of organic materials

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci bakalářské práce bude provedena rešeršní studie na téma depozice organických polovodičových materiálů s ohledem na jejich aplikaci. Student provede sestavení nízko energiového zdroje svazků organických molekul. Tento zdroj bude umístěn do UHV prostředí, kde budou měřeny jeho základní parametry. Dále bude provedena depozice organických materiálů a provedena jejich charakterizace pomocí metod SEM, AFM a XPS.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedení rešeršní studie na téma depozice organických polovodičových materiálů.
- 2) Sestavení zdroje svazků organických molekul.
- 3) Měření vlastností zdroje svazků organických molekul.
- 4) Depozice a analýza ultratenkých organických vrstev.

Seznam odborné literatury:

[1]Kley C. S., Čechal J., Kumagai T., Schramm F., Ruben M., Stepanow S., Kern K., Highly adaptable two-dimensional metal-organic coordination networks on metal surfaces. Journal of the American Chemical Society, 134(14), 6072–5,(2012).

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 22.12.2013



prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá sestavením nízkoteplotní efuzní cely vhodné pro napařování organických materiálů. Je provedena kalibrace provozních teplot efuzní cely. Jsou provedeny depozice organického polovodičového materiálu a je proměřena morfologie povrchu vzniklých vrstev na AFM a SEM zařízení. Součástí práce je rešeršní studie shrnující poznatky o využití organických materiálů v polovodičovém průmyslu.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with assembling of low-temperature effusion cell which is suitable for deposition of organic materials. The calibration of operating temperature of effusion cell is performed. Depositions of organic semiconductor material are realized. Morphology of surface of thin film is studied in AFM and SEM microscope. In the paper background research on the utilization of organic materials in semiconductor industry is presented.

KLÍČOVÁ SLOVA

Efuzní cely, depozice, organické materiály, polovodiče.

KEY WORDS

Effusion cell, deposition, organic materials, semiconductors

MANIŠ, J. Studium molekulárních svazků organických materiálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto práci napsal samostatně pod odborným vedením Ing. Jidřicha Macha, Ph.D. a že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně zaznamenány v seznamu literatury.

.....
Jaroslav Maniš

Děkuji Ing. Jindřichu Machovi, Ph.D. za vedení při tvorbě mé bakalářské práce a za jeho rady a náměty při práci v laboratoři. Také bych chtěl poděkovat své přítelkyni a rodině za podporu v mnoha ohledech.

Obsah

Úvod	1
1 Elektricky vodivé organické látky	2
1.1 Uhlíková vazba	2
1.2 Organické látky s vlastní elektrickou vodivostí	2
1.2.1 Elektricky vodivé polymery	3
1.2.2 Elektricky vodivé organické nízkomolekulární látky	4
2 Příprava tenkých organických vrstev	6
2.1 Metoda rotačního lití	6
2.2 Epitaxe molekulárních svazků	6
2.2.1 Efuzní cela	7
2.2.2 Uspořádávání molekul na povrchu	7
2.3 Selektivní růst	8
2.3.1 Depozice PTCDI-C8	8
2.3.2 Selektivní růst PTCDI-C8 na SiO ₂ modifikovaný vrstvou SiO ₂ .	9
2.3.3 Selektivní růst fluorescenčních látek	10
2.4 Metody analýzy povrchů	11
2.4.1 Mikroskopie atomárních sil	11
2.4.2 Rastrovací elektronový mikroskop	12
2.4.3 Difrakce rychlých elektronů na odrazu	12
3 Organické polovodičové součástky	13
3.1 Tranzistory na organické bázi	13
3.2 Organické LED diody	15
4 Realizace efuzní cely	17
4.1 UHV příruba DN40	17
4.2 Část pro napařování	18
4.3 Měření teplotních charakteristik	20
4.4 Depozice organických molekul	24
Závěr	30
Literatura	31

Úvod

V polovině 50. let minulého století byl navrhnut koncept použití organických molekul a polymerů jako polovodičů. I přes neustálý výzkum v této oblasti, se až na počátku nového století začala tato vize naplňovat. V dnešní době se studiu organických polovodičů věnují skupiny vědců po celém světě, neboť díky specifickým vlastnostem organických molekul je zde vysoká pravděpodobnost, že by mohly doplnit anorganické polovodiče [1].

Organické polovodiče mají oproti anorganickým mnoho výhod. Mezi nejzásadnější patří jejich poměrně snadná depozice, možnost deponovat je na ohebné materiály nebo možnost jemně ovlivňovat jejich vlastnosti úpravou chemické struktury. Tyto vlastnosti dovolily sestavit první organické tranzistory, organické fotovoltaiické články nebo organické LED diody [7, 52].

I přes řadu výhod je zde však ještě mnoho limitů, které je nutno posunout dále nebo úplně odstranit. Mezi ně patří především nízká elektrická vodivost ve srovnání s konvenčními anorganickými polovodiči, poměrně rychlá degradace těchto materiálu při interakci s prvky obsaženými v atmosféře, s čímž souvisí další pokles elektrické vodivosti a málo studovaný mechanismus interakce mezi těmito látkami a substráty, na které jsou deponovány.

V této práci se budeme zabývat jednou z možných technik depozice organických polovodičů na anorganické substráty, a to depozicí napařováním pomocí efuzní cely. Předností této metody je možnost přesně kontrolovat růst organické vrstvy na substrátu a také možnost kombinovat několik typů organických látek, čímž může být dosaženo význačných vlastností u takto vzniklé vrstvy. V budoucnu by tato metoda mohla být základním pilířem při výrobě organických polovodičových součástek, jako organických tranzistorů a fotovoltaiických článků, které by mohly doplnit dnes používané.

1 Elektricky vodivé organické látky

Elektricky vodivé organické látky můžeme rozdělit do dvou skupin. Jsou to kompozitní organické vodivé látky, které se vyznačují nevlastní vodivostí a organické látky s vlastní (intrinsickou) vodivostí [2].

U kompozitních organických molekul je elektrická vodivost zajištěna přidáním příměsi anorganického materiálu, nejčastěji uhlíku nebo kovu, ve formě lupínků, kuliček nebo jemného prášku. Po překonání prahové koncentrace příměsových prvků (perkolační práh) dojde k nárůstu vodivosti o několik řádů. V podstatě se v rámci celé molekuly vytvoří spojitá vodivá vrstva. Elektrická vodivost je silně ovlivněna velikostí a tvarem příměsových částic. Pro ilustraci, u částic kulovitého tvaru vede snížení jejich průměru ke snížení perkolačního prahu [2].

Elektrická vodivost u organických materiálů s vlastní vodivostí je způsobena uspořádáním jejich molekulového řetězce. Podmínkou je přítomnost konjugované vazby¹ v molekulovém řetězci. V této práci budeme používat organické molekuly s vlastní vodivostí, proto se v dalším textu budeme zabývat právě těmito látkami [2, 3].

1.1 Uhlíková vazba

Uhlíková vazba v organických molekulách je realizována elektrony v hybridizovaném stavu sp . Hybridizace označuje energetické sjednocení rozdílných, ale energeticky blízkých orbitalů. Při vzniku dvojné vazby dojde k hybridizaci sp^2 . Překryvem atomárních orbitalů na spojnici jader atomů vzniká vazba σ . Elektrony účastnící se této vazby jsou lokalizovány právě mezi jádry interagujících atomů [3, 4, 7, 22].

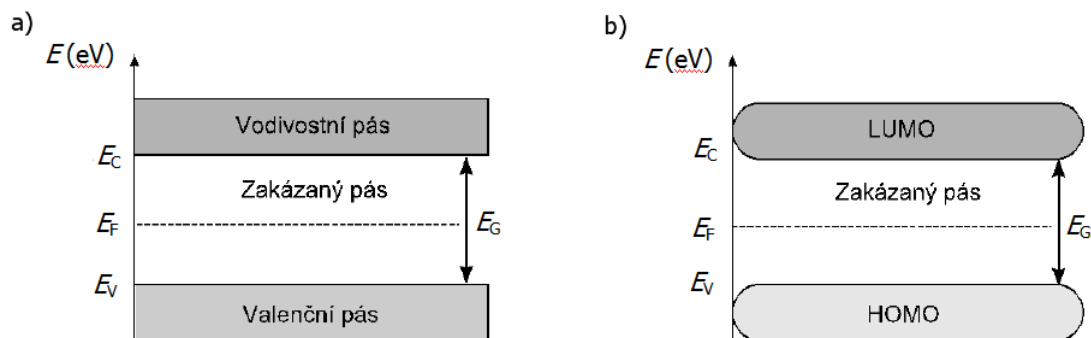
Překryvem atomových orbitalů nad a pod spojnici jader atomů vzniká vazba π . Elektrony podílející se na vzniku vazby π (π - elektrony) jsou snadněji excitovatelné než elektrony podílející se na vazbě σ , což je způsobeno větší vzdáleností od jader atomů. π - elektrony jsou delokalizované, tedy jsou sdíleny více atomovými jádry. V konjugovaném řetězci mohou být π - elektrony delokalizovány podél celého řetězce [3, 4, 7, 22].

1.2 Organické látky s vlastní elektrickou vodivostí

Organické látky mají, co se elektrické vodivosti týče, podobné vlastnosti jako látky anorganické, proto se pro jejich popis využívá podobných fyzikálních modelů.

Anorganické materiály můžeme rozdělit na vodiče, polovodiče a izolanty. O tom, do které skupiny daný materiál patří, rozhoduje šířka jeho zakázaného pásu. Pásové schéma anorganického polovodiče je znázorněno na obrázku 1a). Analogicky můžeme toto dělení provést i pro organické látky. Energie zakázaného pásu je určena rozdílem energií nejvyššího obsazeného molekulárního orbitalu HOMO ("*highest occupied molecular orbital*") a nejnižšího neobsazeného molekulárního orbitalu LUMO ("*lowest unoccupied molecular orbital*"), jak je znázorněno na obrázku 1b). Elektrická vodivost u organických materiálů je tak vždy vyvolána buď elektrickým polem, fotogenerací nebo termální excitací [2, 3].

¹V molekulovém řetězci se střídají jednoduché a vícenásobné (dvojné nebo trojné) kovalentní vazby.



Obrázek 1: a) Pásové schéma anorganického polovodiče. b) Analogické pásové schéma pro elektricky vodivý organický materiál. E_C - hrana vodivostního pásu, E_V - hrana valenčního pásu, E_F - Fermiho hladina, E_G - energie zakázaného pásu [2].

Organické materiály schopné vést elektrický proud lze rozdělit do dvou skupin, polymery a nízkomolekulární látky (monomery a oligomery), přičemž elektrická vodivost těchto dvou typů materiálů je řádově přibližně stejná. V čem se však zásadně liší, je způsob vytváření tenkých vrstev. Pro depozici organických nízkomolekulárních látek je typicky využíváno napařování pomocí efuzních cel, neboť jsou obvykle stálé i za teplot odpovídajících jejich bodům vypařování (obvykle kolem 300°C) [3, 5].

U polymerů je situace odlišná. Z důvodu značné délky polymerního řetězce je vysoká pravděpodobnost rozpadu a degradace polymeru při teplotách potřebných pro napařování. Proto se využívá metody rotačního lití, kterou lze uskutečnit za pokojových teplot [5].

1.2.1 Elektricky vodivé polymery

Polymery jsou organické látky tvořené opakováním identických monomerních jednotek. Elektrickou vodivostí polymerů se začali vědci zabývat v 60. letech minulého století. O rozvoj této problematiky se zejména zasloužili A.G.MacDiarmid, A.J.Heeger a H.Shirakawa, kteří demonstrovali jeden ze způsobů jak zvýšit elektrickou vodivost v polyacetalu, a to dopováním parami jódu. Za svůj přínos byli v roce 2002 odměněni Nobelovou cenou [1].

Polyacetal je jedním z nejjednodušších konjugovaných polymerů. Jedná se v podstatě pouze o řetězec střídajících se jednoduchých a dvojných kovalentních vazeb bez žádných postranních skupin, které by výslednou vodivost ovlivňovaly. Jód, jako silně elektronegativní prvek, odebere π - elektron z polyacetalového řetězce, čímž se v daném místě poruší dvojná vazba. Tímto dojde ke vzniku dvou nosičů náboje, nespárovaného elektronu a elektronové vakance. Oba dva tyto nosiče se mohou volně pohybovat po řetězci. Princip dopování a následného přenosu náboje po řetězci je zřejmý z obrázku 2 [1, 6]. Nabízí se otázka, zda-li dostatečným dopováním není možné zvýšit elektrickou vodivost řádově srovnatelnou s anorganickými polovodiči. Ukázalo se, že toto není možné z několika důvodů:

- **Délky jednoduchých a dvojných vazeb jsou různé**

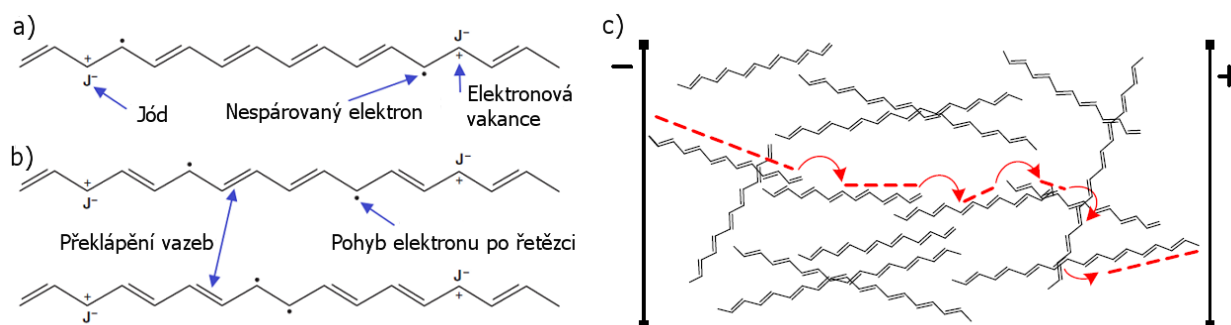
Nehomogenita v délce vazeb způsobuje nedokonalost v elektronové delokalizaci, čímž v řetězci vznikají místa s vyšší a nižší elektronovou hustotou.

- **Rotace bočních skupin porušuje konjugaci řetězce**

Porušení konjugace vede opět k nedokonalé delokalizaci vodivostních π -elektronů.

- **Nehomogenita nanosené tenké vrstvy**

Ukazuje se, že tato nehomogenita je zásadní pro omezení elektrické vodivosti (respektive pohyblivosti nosičů náboje). Je-li nanosená vrstva polymerů na daný substrát, je jejich uspořádání značně nepravidelné. Pohybuje-li se nosič náboje skrze tuto vrstvu, je nucen přeskakovat mezi jednotlivými polymerními řetězci, což vyžaduje dodání energie. Energetické bariéry v celém objemu tenké vrstvy snižují pohyblivost nosičů náboje u organických materiálů s vlastní vodivostí na hodnoty $\mu = 10^{-5} - 10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (pro srovnání u anorganických polovodičů jsou hodnoty pohyblivosti nosičů náboje v rozmezí $\mu = 10^3 - 10^5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Pohyb nosiče náboje tenkou vrstvou polymerů je znázorněn na obrázku 2c) [2, 3].



Obrázek 2: a) Vznik páru elektronová vakance - nespárovaný elektron. b) Pohyb elektronu po molekulovém řetězci s vyznačením překlápění vazeb [1]. c) Předpokládaný pohyb náboje v elektrickém poli [2].

1.2.2 Elektricky vodivé organické nízkomolekulární látky

Vodivé organické nízkomolekulární látky jsou další typ organických materiálů využívaných jako polovodiče². Obvykle jsou to planární molekuly obsahující několik benzenových jader. V benzenovém jádře jsou elektrony, podílející se na π vazbě, delokalizované. To hraje důležitou roli nejen pro elektrickou vodivost, ale zároveň je tato konfigurace důležitá při interakci dvou a více těchto molekul, které se uspořádávají rovnoběžně vůči sobě a jsou drženy poměrně silnou $\pi - \pi$ interakcí [7, 8, 9].

V této práci budeme používat molekulu N,N'-dioktyl-3,4,9,10-perylen tetrakarboxydiimid (PTCDI-C8) a molekulu N,N'-bis-(1-naftyl)-N,N'-difenyl-1,1'-bifenyl-4,4'-diamin (NPB).

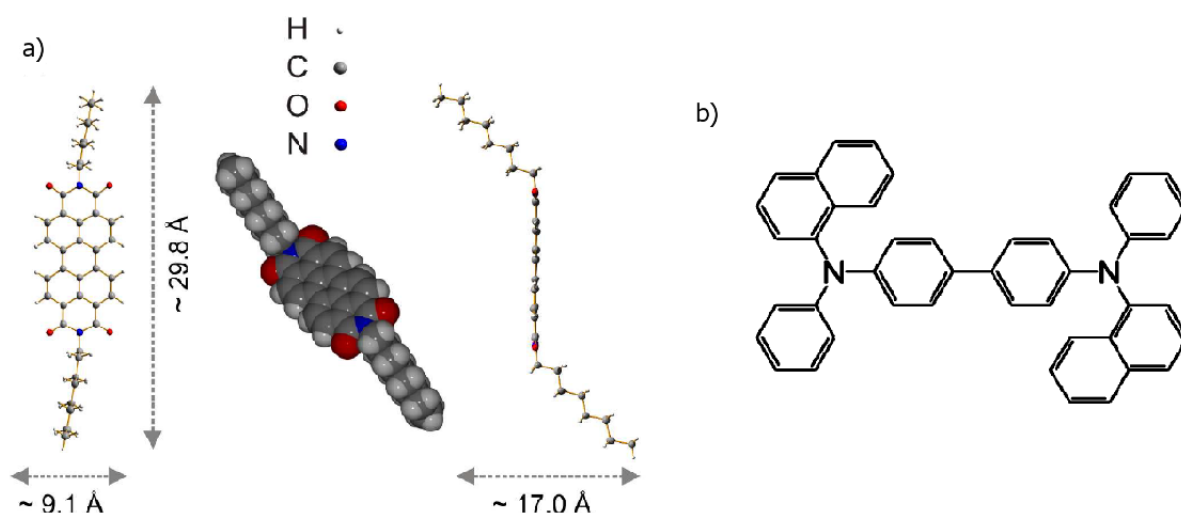
PTCDI-C8 patří do skupiny derivátů perylen diamidu a je typickým zástupcem polovodičů typu *n*. Jedná se o krystalickou látku načervenalé barvy. K planární části³ molekuly, tvořené perylenem, jsou pod úhly $38,3^\circ$ navázány alkylové řetězce, jak je možné

²O těchto materiálech se v literatuře mluví jako o polovodičích určitého typu. Toto označení však nelze chápat analogicky jako u anorganických polovodičů. U organických materiálů se spíše jedná o schopnost přenášet určitý typ nosiče náboje.

³Části, ležící v jedné rovině.

vidět na obrázku 3a) [3]. Přednostmi PTCDI-C8 jsou odolnost vůči světlu, vysoká tepelná stabilita (v porovnání s ostatními organickými látkami) a také nerozpustnost. Elektronová pohyblivost dosahuje v této molekule hodnot $\mu = 1,7 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ⁴.

NPB je představitelem polovodičů typu p. Jedná se o látku schopnou fluorescence a to v oblasti vlnových délek odpovídajících modré barvě. Z tohoto důvodu je používána v organických LED diodách. Strukturní vzorec NPB je znázorněn na obrázku 3b) [7, 8].



Obrázek 3: a) Strukturní vzorec a rozměry PTCDI-C8 [7]. b) Strukturní vzorec molekuly NPB [10].

⁴Tato hodnota byla naměřena pro OTFT transistor, kde bylo PTCDI-C8 použito jako vodivého kanálu (viz kapitola 3.1).

2 Příprava tenkých organických vrstev

Pro nanesení tenké vrstvy na vhodný substrát lze využít mnoha metod. U organických materiálů se využívají převážně dvě hlavní metody. Pro vodivé polymery se osvědčila metoda rotačního lití ("*spin coating*") a pro organické makromolekuly se využívá epitaxe molekulárních svazků (MBE - "*molecular beam epitaxy*")⁵ [5, 18].

2.1 Metoda rotačního lití

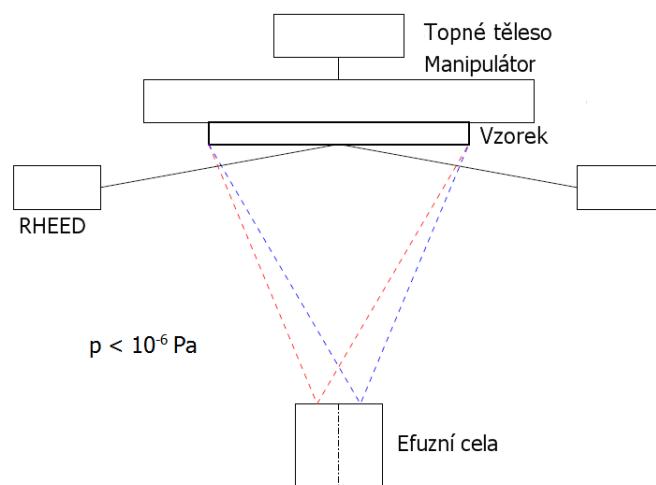
Metoda rotačního lití je vhodná pro přípravu rovnoměrných tenkých vrstev v tloušťkách obvykle 0,2 – 4 μm. Při procesu nanášení vrstvy není nutné jakkoliv zvyšovat teplotu látky ani substrátu a nemůže tedy dojít k degradaci materiálu, což je zejména u polymerů žádané [5].

Substrát je umístěn na osu rotačního zařízení ("*spincoater*") a je na něm zafixován podtlakem. Na střed je nanesena vrstva požadovaného vzorku ve formě roztoku.

V dalším kroku je spuštěna rotace spincoateru, čímž dojde k rozlití roztoku po substrátu. Přebytečný roztok odkapává mimo substrát, čímž dochází ke zmenšování tloušťky nanášené vrstvy. Tímto procesem je docílena rovnoměrná vrstva požadované tloušťky [5].

2.2 Epitaxe molekulárních svazků

Metoda MBE využívá odpařování požadované látky a její následnou kondenzaci na substrátu v podmínkách velmi vysokého vakua UHV (10^{-5} – 10^{-8} Pa). Samotný proces sestává ze dvou kroků. Prvním krokem je ohřev deponované látky na teplotu vypařování nebo sublimace v efuzní cele. Druhou částí depozice je pak samotná kondenzace deponované látky na substrátu a její uspořádávání, které může být ovlivněno teplotou substrátu. Typické schéma aparatury pro MBE je na obrázku 4 [5, 18].



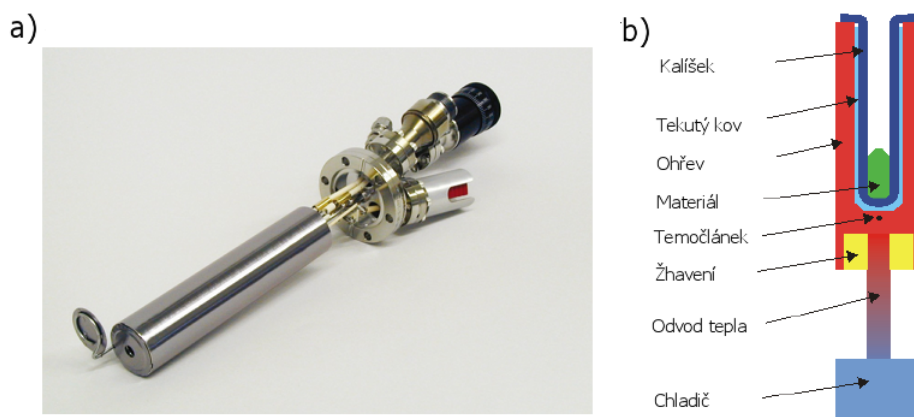
Obrázek 4: Uspořádání aparatury pro epitaxi molekulárních svazků MBE.

⁵Časté je i označení OMBE ("*organic molecular beam epitaxy*") nebo OMBD ("*organic molecular beam deposition*").

2.2.1 Efuzní cela

Efuzní cela je zařízení pro depozici materiálů v UHV. Existuje velké množství různých typů efuzních cel určených pro různé typy látek. V této práci budeme používat celu nízkoteplotní, pro teploty do 300 °C.

Hlavními částmi běžné komerční nízkoteplotní efuzní cely jsou ohřívaná část a část přírubová (obrázek 5). V ohřívané části (na obrázku dlouhý válec) je umístěn PBN kalíšek, do kterého umísťujeme deponovaný materiál (depozit). PBN kalíšek je vsazen do píčky (obvykle měděné), zahříván na teplotu vypařování nebo sublimace dané látky. Ohřev je realizován emisí elektromagnetického záření ze žhaveného vlákna (často wolframového). V některých případech je mezi píckou a PBN kalíšek umístěn tekutý kov, aby se docílilo snadnějšího vedení tepla. Na spodní stranu píčky je umístěn termočlánek, který zprostředkovává informaci o teplotě. Pro fokusaci odpařeného materiálu slouží kolimátor, který je připevněn na horní straně kalíšku. Množství deponované látky je kontrolováno teplotou ohřevu a clonou, umístěnou nad kolimátorem [11].



Obrázek 5: a) Nízkoteplotní efuzní cela společnosti MBE Komponenten [11]. b) Schéma ohřívané části (píčky s PBN kalíškem) [11].

2.2.2 Uspořádávání molekul na povrchu

Při interakci deponované molekuly se substrátem může nastat několik procesů, které rozhodnou, jaký způsobem bude molekula k povrchu navázána.

Po dopadu na substrát začíná molekula difundovat po jeho povrchu do energeticky nejvýhodnějšího místa. Tato místa jsou obvykle hranice zrn, nerovnosti povrchu nebo zlomy. Povrchová difúze je silně závislá na teplotě substrátu. Při nižší teplotě než optimální se nemusí molekula dostat do energeticky nejvýhodnějšího místa, čímž může dojít pouze k slabému navázání, které se může projevit ve stabilitě výsledné vrstvy. Naopak při vyšší teplotě může dojít k desorbci molekuly [5, 7, 18, 23].

Samotné začlenění molekuly do vrstvy může nastat dvěma způsoby, chemisorbcí nebo fyzisorbcí. Při chemisorbcí se molekula k povrchu substrátu navazuje prostřednictvím pevných kovalentních nebo iontových vazeb, čímž vzniká pevně přilnutá vrstva. Při fyzisorbcí, která je nejčastější při interakci organických molekul s kovovým substrátem,

se při interakci uplatňují van der Waalsovy síly. Nejčastěji mezi konci alkylových řetězců a substrátem [5, 7, 18, 23].

Růst vrstev může obecně probíhat třemi způsoby. Jsou to růst vrstva po vrstvě (Frank - van der Merwův růst), ostrůvkový růst (Vollmer - Weberův růst) a kombinace těchto dvou (Stranski - Krastanův růst). Při růstu vrstvy po vrstvě nejprve molekuly zaplní jednu celou monovrstvu a poté na ní vytvoří další monovrstvu. Ostrůvkový růst se vyznačuje shlukováním molekul do domén, které rostou postupně do výšky i šířky, čímž dojde ke spojení většiny ostrůvků. Poslední typ růstu vykazuje jak ostrůvkový růst, tak růst vrstvy po vrstvě [5, 7, 18].

2.3 Selektivní růst

Selektivní růst je metoda depozice molekul na požadovaný substrát. Při této metodě dochází k růstu vrstvy jen na zvolených místech. Nukleace molekul začíná přednostně na energeticky výhodných místech, jako jsou hranice zrn, cizorodé příměsi, či různé defekty materiálu. Z tohoto důvodu je možné vytvořit preferovaná místa, na kterých bude docházet k nukleaci deponovaných molekul [9, 10].

Jednou z možností jak dosáhnout těchto preferovaných míst, je vytvořit litografickou strukturu (ostrůvky, pásy, či jiné obrazce). Molekuly poté začnou vytvářet vrstvy buď na těchto vzorcích nebo mimo ně. V obou případech bude výsledkem tenká vrstva deponovaného materiálu jen v místech k tomu zvolených [9, 10].

Využití metody selektivního růstu u organických polovodičových součástech je nutné zejména proto, že organické látky jsou obvykle velmi citlivé na zvýšené teploty ($T > 150^\circ\text{C}$) a také na elektromagnetické záření, využívající se při litografii (UV záření, IR záření). Z tohoto důvodu není možné nejprve nanést vrstvu žádaného organického materiálu a poté v ní litograficky vytvářet struktury. Právě proto je nejvhodnějším řešením selektivní růst [9, 10].

2.3.1 Depozice PTCDI-C8

PTCDI-C8 je typickým představitelem organických polovodičů typu n. Studium PTCDI-C8 je proto zaměřeno na využití této látky v organických tranzistorech. Pohyblivost nosičů náboje (respektive vodivost) je výrazně ovlivněna prostorovým uspořádáním vrstvy (viz. odstavec 1.2). Z tohoto důvodu je snaha prozkoumat mechanismus růstu, prostorové uspořádání vzniklé vrstvy a závislost růstu vrstvy na teplotě [7, 12].

- **Depozice PTCDI-C8 na Si(100)**

Depozice PTCDI-C8 na Si(100) substrát probíhala v podmínkách UHV. Křemíkový substrát byl nejprve žíhán pro dosažení čistého povrchu. Během samotné depozice byla teplota substrátu udržována na pokojové teplotě. Následně byla provedena depozice tenké vrstvy PTCDI-C8 (teplota vypařování $t \approx 300^\circ\text{C}$) [12].

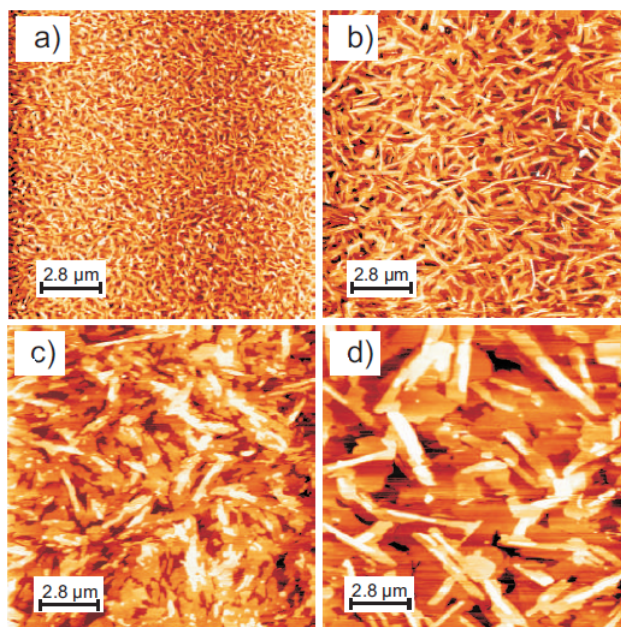
Ukázalo se, že takto deponovaná vrstva vytváří neuspořádané shluky (domény) na povrchu křemíku. Navíc dochází ke vzniku prasklin, pravděpodobně vzniklých v důsledku kumulace napětí během ochlazování, které významně snižují celkovou vodivost vrstvy [9, 12].

- **Depozice PTCDI-C8 na SiO_2**

SiO_2 se často využívá v organických tranzistorech jako izolátor, na který je nanesen polovodič. Z tohoto důvodu proběhlo několik experimentů s cílem prostudovat mechanismus růstu PTCDI-C8 na SiO_2 .

Depozice PTCDI-C8 na SiO_2 probíhala v podmínkách UHV. Nejprve byla nadeponována 270 Å vysoká vrstva PTCDI-C8 při teplotě substrátu $\sim 150^\circ\text{C}$. S použitím AFM mikroskopu se zjistilo, že PTCDI-C8 vykazuje typ růstu vrstva po vrstvě [7].

V dalších experimentech byla studována závislost uspořádání molekul na povrchu na teplotě substrátu. Se vzrůstající teplotou substrátu roste délka zrn od $\sim 500\text{ nm}$ (pro pokojovou teplotu) až po několik mikronů (pro teploty převyšující 90°C), jak je znázorněno na obrázku 6. Optimální podmínky pro růst PTCDI-C8 se ukázaly být: rychlost depozice $3 - 6\text{ Å/min}$ a teplota substrátu $T = 90^\circ\text{C}$. Při těchto podmínkách převládá orientace molekul PTCDI-C8 kolmo k povrchu, přičemž jsou molekuly uvnitř zrna k sobě vázány $\pi - \pi$ interakcí [7].

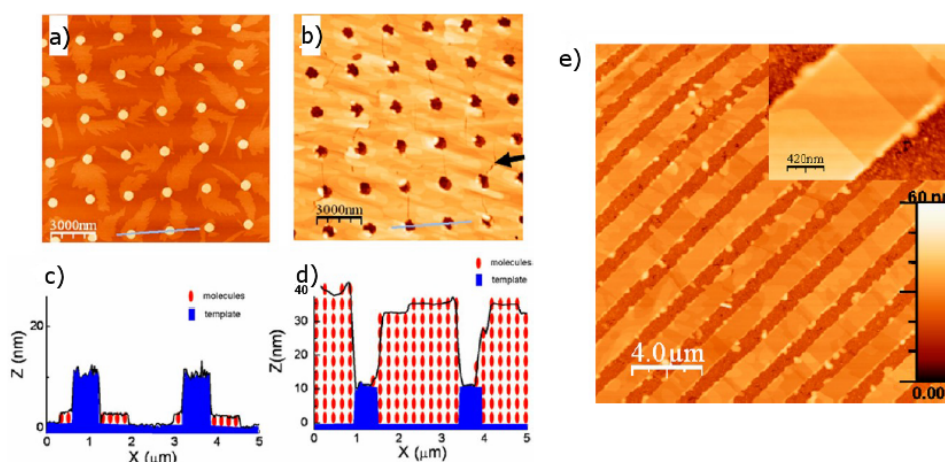


Obrázek 6: Vrstva PTCDI-C8 nadeponovaná na SiO_2 při a) pokojové teplotě, b) teplotě 70°C , c) 90°C , d) 150°C . Měření byly prováděny pomocí AFM v kontaktním módu. [7].

2.3.2 Selektivní růst PTCDI-C8 na SiO_2 modifikovaný vrstvou SiO_2

Růst byl realizován v podmínkách stejných jak v předchozím odstavci 2.3.1. Nicméně na substrátu byly litografickou metodou vytvořeny ostrůvky SiO_2 široké $0,6\text{ μm}$ a vysoké 10 nm . Vzdálenost mezi ostrůvky byla $2,4\text{ μm}$. Byly provedeny dvě depozice s výškami vrstev $0,5\text{ ML}$ a 20 ML [9, 10].

Po depozici bylo zjištěno, že molekuly se nalézají mimo ostrůvky SiO_2 . Molekuly nepřilnuly k vrcholu ostrůvků ani tehdy, když byla deponovaná vrstva mnohem vyšší



Obrázek 7: a) Topografie povrchu pro růst 0,5 ML PTCDI-C8 na křemíkovém substrátu pokrytém ostrůvky SiO_2 (obrázek získaný pomocí AFM). b) Topografie povrchu pro růst 20 ML PTCDI-C8 na křemíkovém substrátu pokrytém ostrůvky SiO_2 (obrázek získaný pomocí AFM). c,d) Schéma růstu vrstev PTCDI-C8 mezi ostrůvky SiO_2 . e) Topografie povrchu pro růst PTCDI-C8 na křemíkovém substrátu pokrytém zlatými pásy (obrázek získaný pomocí AFM) [9].

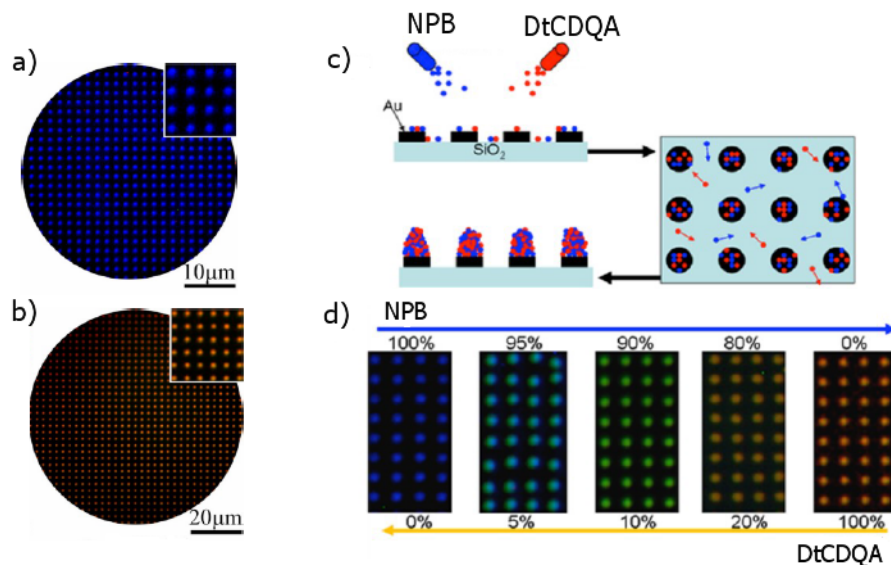
než samotné ostrůvky. Znázornění růstu PTCDI-C8 mezi ostrůvky SiO_2 je na obrázku 7c, d). Podobného výsledku bylo dosaženo při nanesení zlatých ostrůvků na křemíkovém substrátu a dokonce i při vytvoření zlatých pásů na křemíkový substrát [9, 10].

2.3.3 Selektivní růst fluorescenčních látek

Podobné práce, jako výše popsané experimenty, byly prováděny i pro molekuly vykazující fluorescenci. Schopnost selektivního růstu byla prokázána u molekul NPB a DtCDQA. Dále bylo prokázáno, že je možné tyto látky kombinovat [10].

Na křemíkový substrát byly nanесeny zlaté ostrůvky, kdy pro NPB byl jejich průměr $d = 600 \text{ nm}$ a periodičita $p = 1,8 \mu\text{m}$. U DtCDQA byl průměr zlatých ostrůvků $d = 1 \mu\text{m}$ s periodicitou $p = 2,5 \mu\text{m}$. Rychlost depozice byla $0,1 \text{ nms}^{-1}$ u NPB a $0,2 \text{ nms}^{-1}$ u DtCDQA. Teploty substrátu byla $T = 133^\circ\text{C}$ u NPB a $T = 184^\circ\text{C}$ u DtCDQA [10].

V prvním případě byly deponovány látky jednotlivě, čímž byla ověřena jejich schopnost selektivního růstu. Výsledky z fluorescentní mikroskopie ukazují obrázek 8a, b). Dále byly oba organické polovodiče deponovány současně v různých poměrech. Výsledky z obrázku 8d) ukazují způsob vytváření struktury vykazující různou fluorescenci [10].



Obrázek 8: a) Výsledek fluorescentní mikroskopie pro selektivní růst NPB, průměr ostrůvku $d = 600$ nm, periodičita struktury $p = 1,8 \mu\text{m}$. b) Výsledek fluorescentní mikroskopie pro selektivní růst DtCDQA, průměr ostrůvku $d = 1 \mu\text{m}$, periodičita struktury $p = 2,5 \mu\text{m}$. c) Schématické znázornění uspořádání experimentu s depozicí dvou typů molekul, NPB a DtCDQA. d) Výsledek fluorescentní mikroskopie pro selektivní růst současně deponovaných molekul NPB a DtCDQA v různých poměrech zastoupení [10].

2.4 Metody analýzy povrchů

Metody analýzy povrchů slouží k vizualizaci morfologie povrchů a k analýze jejich chemického složení. Pro vizualizaci povrchů ve 3D je velmi často používána metoda mikroskopie atomárních sil (AFM - "atomic force microscopy"), pro 2D zobrazení je používán rastrovací elektronový mikroskop (SEM - "scanning electron microscope"). V průběhu depozice v podmínkách UHV je potřeba kontrolovat růst deponované vrstvy, k tomuto účelu se často využívá metody difrakce rychlých elektronů na odrazu (RHEED - "reflection high energy electron diffraction").

2.4.1 Mikroskopie atomárních sil

Mikroskopie atomárních sil je analytická metoda vhodná k zobrazování morfologie povrchů. Základní částí AFM mikroskopu je ostrý hrot připevněný na ohebném ramínku. Velikost hrotu je řádově několik desítek μm , avšak samotná špička by měla být v ideálním případě zakončena jediným atomem. Délka ramínka se pohybuje v řádu stovek μm . Ramínko je osvětlováno laserovým svazkem, který se odráží a dopadá do fotodetektoru, jak je schematicky znázorněno na obrázku 9a). Změní-li se poloha ramínka, změní se i poloha dopadu odraženého laserového svazku. Tímto způsobem je zaznamenávána poloha ramínka (respektive hrotu) při rastrování vrstvy a ze získaných dat je možné provést trojrozměrnou vizualizaci povrchu. Během rastrování se hrot pohybuje v pravidelném rastru po povrchu vzorku [13].

Rozlišujeme dva typy nejčastěji užívaných módů, ve kterých může AFM mikroskop pra-

covat. Jedná se o kontaktní a bezkontaktní mód. Při kontaktním módu je hrot AFM v kontaktu s povrchem vzorku, čímž dojde k prohnutí ramínka. S nerovností povrchu se mění prohnutí ramínka, z čehož je možné zpětně rekonstruovat morfologii povrchu. V kontaktním módu působí mezi hrotem a povrchem třecí síly, které mohou způsobit poškození vzorku. Z tohoto důvodu se častěji využívá bezkontaktního módu, kdy hrot AFM a povrch vzorku nejsou v přímém mechanickém kontaktu. Mezi hrotem a povrchem vzorku působí van der Wallsovy síly, které jsou významně závislé na vzdálenosti. Se změnou vzdálenosti mezi hrotem a povrchem vzorku dochází ke změně rezonanční frekvence nosníku [13].

Metoda AFM dosahuje vysokého rozlišení, může zobrazovat jednotlivé atomy a nevyžaduje vždy podmínky UHV. Naproti tomu je výrazně limitována maximálním převýšením vzorku ($10 - 20 \mu\text{m}$) a maximální plochou schopnou detekovat při jednom rastrování (obvykle $150 \times 150 \mu\text{m}^2$) [13].

2.4.2 Rastrovací elektronový mikroskop

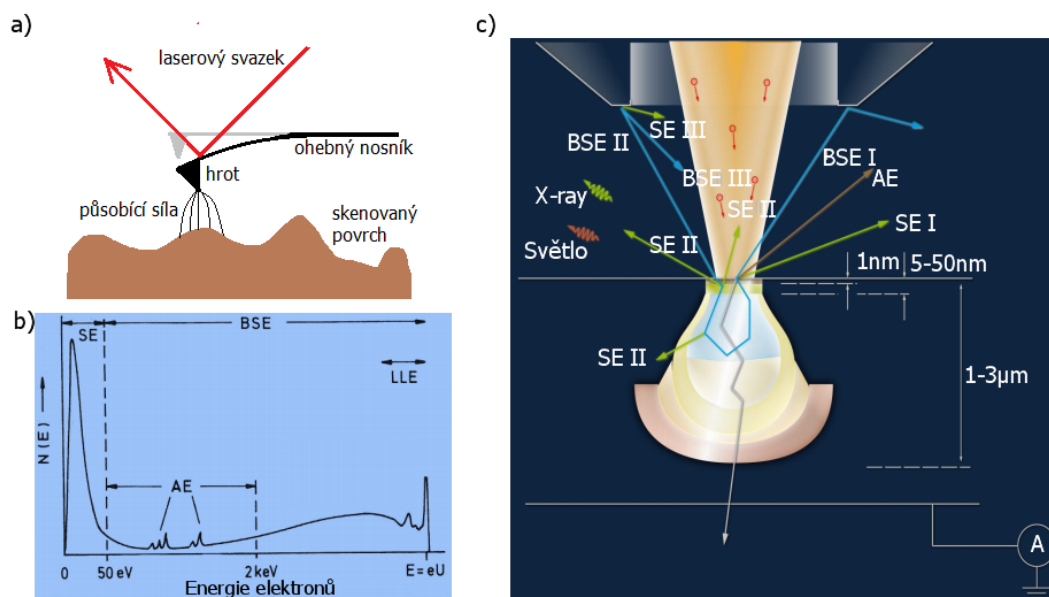
Rastrovací elektronový mikroskop je zařízení pro vizualizaci povrchů s rozlišovací schopností menší jak 10 nm . Sestava SEM mikroskopu je obdobná jako u optického mikroskopu s tím rozdílem, že fotony jsou nahrazeny elektrony a optické čočky jsou nahrazeny čočkami elektromagnetickými, což jsou v podstatě cívky vytvářející magnetické pole, které ovlivňuje trajektorii elektronů. Napětí urychlující elektrony u stolních SEM zařízení se pohybuje v rozmezí ($1 - 30$) kV. Při skenování povrchu je svazek elektronů vychylován tak, aby skenoval řádek po řádku celé zorné pole [14 - 16].

Elektrony dopadající na povrch s ním interagují mnoha způsoby, jak je znázorněno na obrázku 9c). Pro vizualizaci povrchu se nejčastěji využívají sekundární elektrony (SE - "*secondary electrons*") nebo zpětně odražené elektrony (BSE - "*backscattered electrons*"). Sekundární elektrony jsou elektrony emitované z vnějších slupek atomů vzorku. Zpětně odražené elektrony jsou elektrony původního elektronového svazku, které se vlivem elastických srážek s atomy vzorku zpětně odrazily do detektoru. SEM zařízení dokáže detekovat také Augerovy elektrony nebo rentgenové záření, čehož se využívá k získání informace o chemickém složení vzorku. Energiové spektrum detekovaných elektronů je znázorněno na obrázku 9b) [14 - 16].

2.4.3 Difrakce rychlých elektronů na odrazu

Difrakce rychlých elektronů na odrazu ("*reflection high energy electron diffraction*", RHEED) je metoda vhodná zejména ke kontrole růstu deponované vrstvy při metodě MBE. Výhoda této metody spočívá v její vysoké povrchové citlivosti. Dopadající elektrony musí svírat s povrchem velmi malý úhel (cca 3°) úhel a proto aparatura RHEED nebrání v depozici molekul, jak je vidět z obrázku 4. Aparatura pro metodu RHEED je složena z elektronového zdroje, který produkuje elektrony o energiích desítek keV, a fotoluminiscenčního detektoru [5, 23].

Nerovnosti povrchu (růst vrstvy) mají značný vliv na difrakční obrazec. V průběhu růstu vrstvy jsou pozorovány postupně klesající oscilace intenzity odražených elektronů s periodou rovnou době růstu jedné monovrstvy. Maximum intenzity odpovídá hladkému povrchu při růstu vrstvy po vrstvě. Při zaplňování povrchu klesá signál odražených elektronů až do doby, kdy je zaplněna přibližně polovina monovrstvy.



Obrázek 9: a) Schéma AFM mikroskopu. b) Energiové spektrum detekovaných elektronů v SEM mikroskopu. SE - sekundární elektrony, BSE - zpětně odražené elektrony, AE - Augerovy elektrony [16]. c) Interakce elektronového svazku SEM mikroskopu s povrchem vzorku [16].

Následně signál opět stoupá až do doby, kdy je zaplněna celá vrstva. Při růstu další vrstvy se průběh signálu opakuje. Tímto způsobem je možné kontrolovat počet mono-vrstev deponované látky [5, 23].

3 Organické polovodičové součástky

Hlavním důvodem studia vodivých organických tenkých vrstev je možnost kombinovat tyto látky s anorganickými materiály a tím vytvářet polovodičové součástky. V dnešní době se zájem soustředí především na organické tranzistory (OTFT - "organic thin film transistor") a organické LED diody (OLED - "organic light-emitting diod") [10, 16].

3.1 Tranzistory na organické bázi

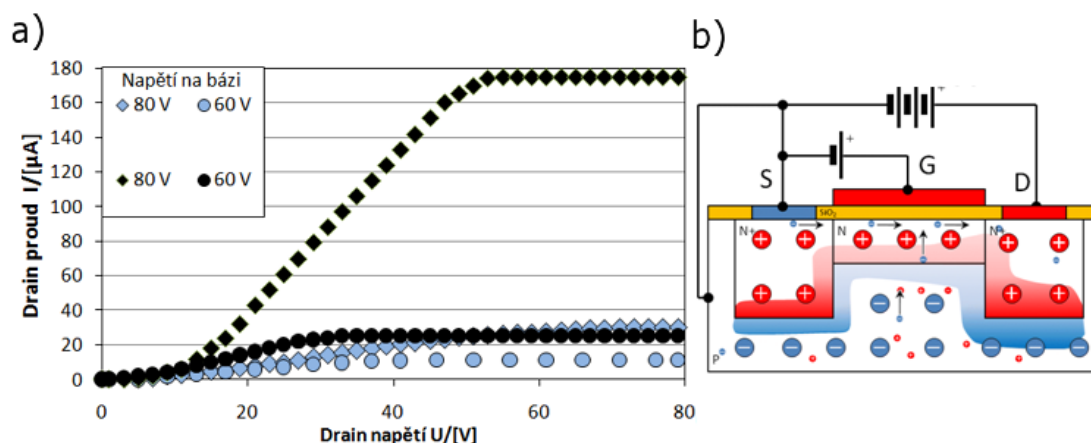
Tranzistorem rozumíme polovodičovou součástku schopnou regulovat proud malými změnami napětí. Klasický unipolární tranzistor⁶ je sestaven ze tří kontaktů. Jsou to emitor ("source"), báze ("gate") a kolektor ("drain"). Elektrody source a drain jsou přivedeny na polovodič stejného typu n nebo p. Mezi těmito dvěma polovodiči je vsazen polovodič opačného typu, ke kterému je přivedena elektroda gate. Tímto postupem vzniknou v tranzistoru dva PN přechody [10, 16].

Přivedeme-li na emitor a kolektor napětí, nebude mezi těmito elektrodami protékat žádný proud, neboť vždy jeden z PN přechodů bude zapojen v závěrném směru. Pokud však zároveň přivedeme napětí na bázi, vznikne mezi emitorem a kolektorem vodivý

⁶V unipolárním tranzistoru je proud zprostředkováván pouze jedním typem nosiče náboje, tj. elektrony nebo elektronovými vakancemi (děrami).

kanál, kterým začne téci elektrický proud tvořený majoritními nosiči náboje⁷. Princip vzniku vodivého kanálu je znázorněn na obrázku 10b). Velikostí napětí přiloženého na bázi můžeme snadno regulovat velikost proudu tekoucího tranzistorem. Můžeme říct, že se jedná o organický tranzistor řízený polem (OFET - "*organic field effect transistor*") [16, 18].

V případě organických tranzistorů je jako vodivý kanál použit právě organický materiál. Pro výrobu organických tranzistorů je využíváno selektivního růstu vrstev organických molekul. Výhodu použití této metody ilustruje graf na obrázku 10a), kde je vynesena výstupní charakteristika takto vyrobeného tranzistoru. Modře jsou vyneseny grafy výstupních charakteristik pro jednotlivá napětí na bázi, při nanesení vrstvy PTCDI-C8 na čistý křemíkový substrát. V tomto případě se pohyblivost nosičů náboje pohybovala kolem hodnoty $\mu = 0,13 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Černě jsou pak vyneseny grafy výstupních charakteristik při stejných hodnotách napětí na bázi pro vrstvu PTCDI-C8 vzniklou využitím metody selektivního růstu. Při využití metody selektivního růstu se pohyblivost nosičů náboje blížila hodnotě $\mu = 1,0 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, což vedlo k mnohanásobnému zvýšení výstupního proudu. Vzrůst výstupního proudu je spojen se vzrůstem pohyblivosti nosičů náboje ve vodivé vrstvě. Zvýšení pohyblivosti nosičů náboje je pravděpodobně výsledkem snížení počtu trhlin ve vodivém kanálu. Na snížení počtu trhlin má výrazný vliv právě použití metody selektivního růstu [9].



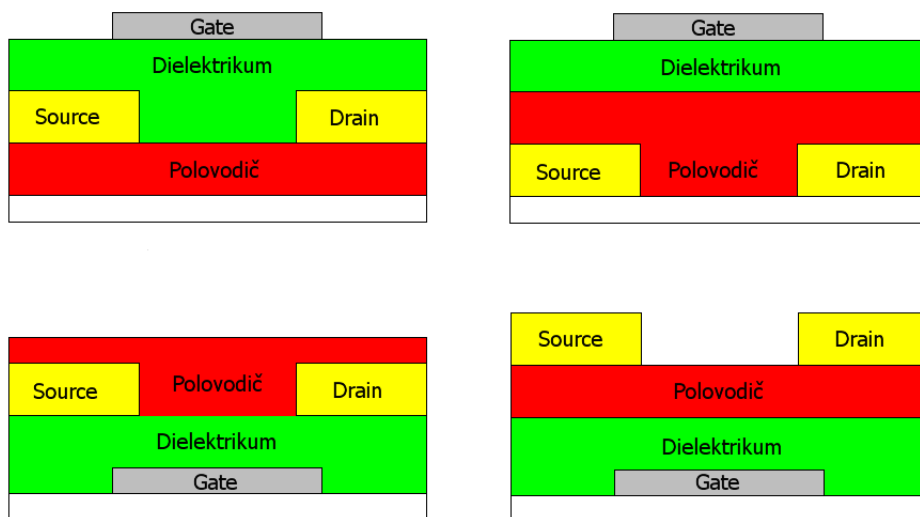
Obrázek 10: a) Výstupní charakteristika organického FET tranzistoru. Modře jsou vyneseny výstupní charakteristiky pro vrstvu PTCDI-C8 na čistém křemíkovém substrátu. Černě jsou vyneseny výstupní charakteristiky pro substrát s vrstvou PTCDI-C8 nanesenou využitím metody selektivního růstu. b) Princip vzniku vodivého kanálu po přiložení napětí na bázi [17].

U klasických anorganických tranzistorů existuje velké množství používaných architektur (např. MOSFET, MESFET, atd.⁸). U organických tranzistorů se obvykle

⁷Jako majoritní nosiče náboje se v polovodičích označují ty nosiče, které odpovídají za většinový přenos náboje. U polovodičů typu n jsou to elektrony, u polovodičů typu p jsou to díry. Opakem majoritních nosičů jsou minoritní nosiče náboje, které zprostředkovávají menšinový přenos.

⁸MOSFET - "*metal oxide semiconductor field effect transistor*", MESFET - "*metal semiconductor field effect transistor*".

využívá architektura TFT (*"thin film transistor"*), kde jsou emitor a kolektor tvořeny anorganickými prvky a vodivý kanál je tvořen organickým materiálem. Existují čtyři hlavní geometrie vzájemného uspořádání těchto tří částí. Tyto možnosti jsou znázorněny na obrázku 11 [16 - 18, 20].



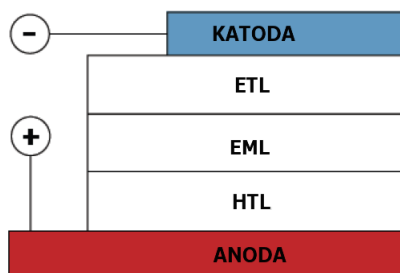
Obrázek 11: Čtyři základní typy architektury pro výroby OFET. Převzato z: [20].

3.2 Organické LED diody

Organické LED diody jsou polovodičové součástky, jejichž elektroluminiscenční částí tvoří organické materiály. Organické LED diody se využívají pro výrobu displejů, přičemž je zde řada výhod oproti klasickým LCD displejům.

Nejjednodušší provedení organické LED diody je znázorněno na obrázku 12. Mezi kovovou katodou a průhlednou anodou je několik vrstev organických materiálů. Jedná se o vrstvu pro přenos elektronů (ETL - *"electron transport layer"*), vrstvu pro přenos děr (HTL - *"hole transport layer"*) a emisní vrstvu (EML - *"emissive layer"*). Po přivedení vhodného napětí na elektrody (obvykle se jedná o jednotky voltů), dojde k přenosu děr z katody a elektronů z anody. Tyto dva nosiče náboje rekombinují v emisní vrstvě, čímž dochází ke vzniku elektromagnetického záření [18, 19].

Jednotlivé organické vrstvy jsou nanášeny na ITO (*"indium tin oxide"*), které je nanášeno na skleněný substrát. V případě, že je použito polymerních organických polovodičů jsou vrstvy připraveny metodou rotačního lití. Je-li pro vytvoření vrstev použito nízkomolekulárních organických látek, využívá se metoda napařování (viz kapitola 2). Výška organických vrstev je obvykle přibližně 100 nm [18, 19].

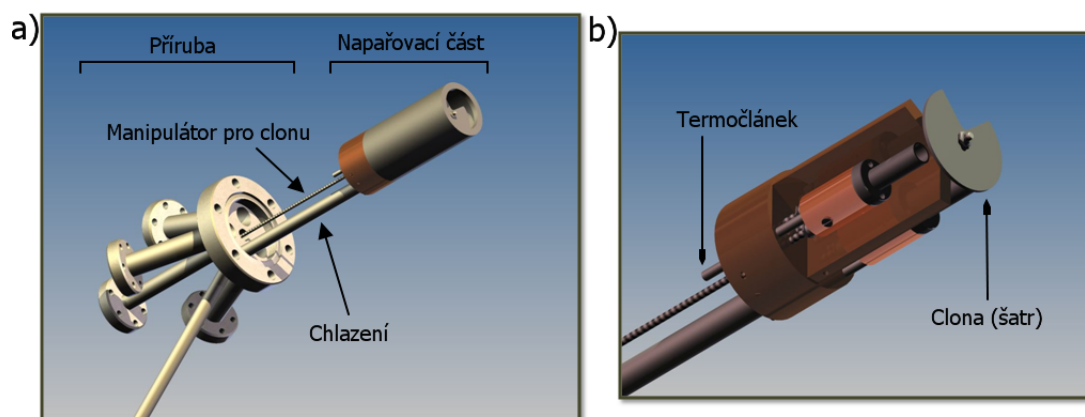


Obrázek 12: Schéma typické organické LED diody. Mezi elektrody je nanесena vrstva pro přenos elektronů (ETL), vrstva pro přenos děr (HTL) a emisní vrstva (EML) [21].

4 Realizace efuzní cely

V rámci práce byla realizována efuzní cela pro napařování organických molekul. Tato cela byla navržena panem Ing. Jindřichem Machem, Ph.D.

Trojrozměrný model navržené efuzní cely je na obrázku 13a). Cela se skládá ze dvou hlavních částí: UHV příruby DN40 a měděného chlazeného kusu, kde jsou umístěny napařovací členy.



Obrázek 13: a) 3D model realizované nízkoteplotní efuzní cely. b) Detailní pohled na část pro napařování

4.1 UHV příruba DN40

Příruba je část, prostřednictvím které je cela připojena k UHV systému. Protože se jedná o celu se třemi nezávislými komorami, jsou skrze přírubu vyvedeny tři větve. Každá větev obsahuje elektrické průchodky pro připojení vodičů a termočlánek. Dále je přírubou vyvedeno potrubí pro přívod a odvod chladicí kapaliny. Toto potrubí je koaxiální⁹ a je navrženo tak, aby se přívod a odvod vody daly připojit pomocí systému Swagelok. Chladicí potrubí je spojeno s částí pro napařování, kde dochází k výměně tepla.

Středem příruby je vedena závitová tyč, na jejímž konci je umístěna clona. Závitová tyč je u ústí komory připojena k vlnovci, prostřednictvím kterého je možné točit clonou kolem její osy.

Jak již bylo předesláno, každou ze tří větví, vedoucích skrze přírubu, jsou vedeny vodiče a termočlánek. Pro vedení elektrického proudu byl zvolen vodič pokrytý izolační vrstvou z kaptonové izoloce o průměru 0,7 mm, kterým může téci maximální proud o hodnotě $I = 7\text{ A}$. Pro kontrolu teploty píčky byl použit termočlánek typu J. Tento termočlánek je tvořen kombinací konstantanu a železa. Jednotlivé vodiče byly odizolovány keramickými izolátory.

Příruba i potrubí pro chlazení jsou vyrobeny z nerezové oceli.

⁹Koaxiální chlazení je tvořeno dvěma sousedními válci. Vnitřním potrubím je přiváděna studená voda a vnějším potrubím je odváděna voda ohřátá, čímž je dosaženo její neustálé cirkulace.

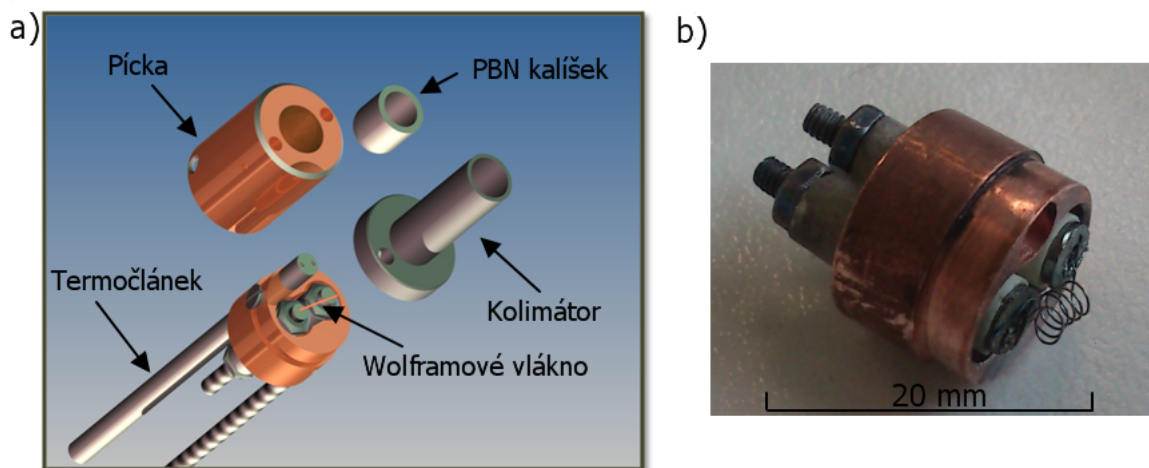
4.2 Část pro napařování

Část, kde dochází k napařování organických materiálů, je tvořena třemi identickými a nezávislými komorami, jak je znázorněno na obrázku 13b). V každé ze tří komor je umístěna sestava pro ohřev daného materiálu. Jak je zobrazeno na fotografii na obrázku 14a), je tato sestava tvořena čtyřmi částmi. Jsou to žhavení, pícka, PBN kalíšek a kolimátor.

Kromě kolimátoru a PBN kalíšku jsou všechny části vyrobeny z bezkyslíkaté mědi. Výrobce tohoto materiálu garantuje obsah mědi vyšší než 99,996 %, čímž je zajištěna vysoká homogenita celého materiálu. Taková měď má vysokou tepelnou vodivost a vykazuje stálost materiálu po velmi dlouhou dobu [24]. Stálost materiálu je důležitá zejména proto, že jsou žhavení a pícka neustále vystavovány poměrně vysokým teplotám, které by u obyčejné mědi mohly způsobit zrychlení degradace materiálu (oxidaci), což by mohlo být problémem při práci v podmínkách vysokého vakua.

- **Žhavení**

Jako žhavení je označována válcovitá část, na kterou jsou přivedeny vodiče. Vodiče jsou připevněny ke šroubům, na jejichž hlavičku je přibodováno žhavicí vlákno. Průchodem proudu dochází k rozžhavení vlákna a emisi elektromagnetického záření, čímž dochází k ohřevu pícky. Reálná podoba žhavení, včetně měřítka, je znázorněna na obrázku 14b).



Obrázek 14: a) Detailní pohled na element pro depozici materiálu. b) Detailní pohled na žhavicí vlákno.

- **Píčka**

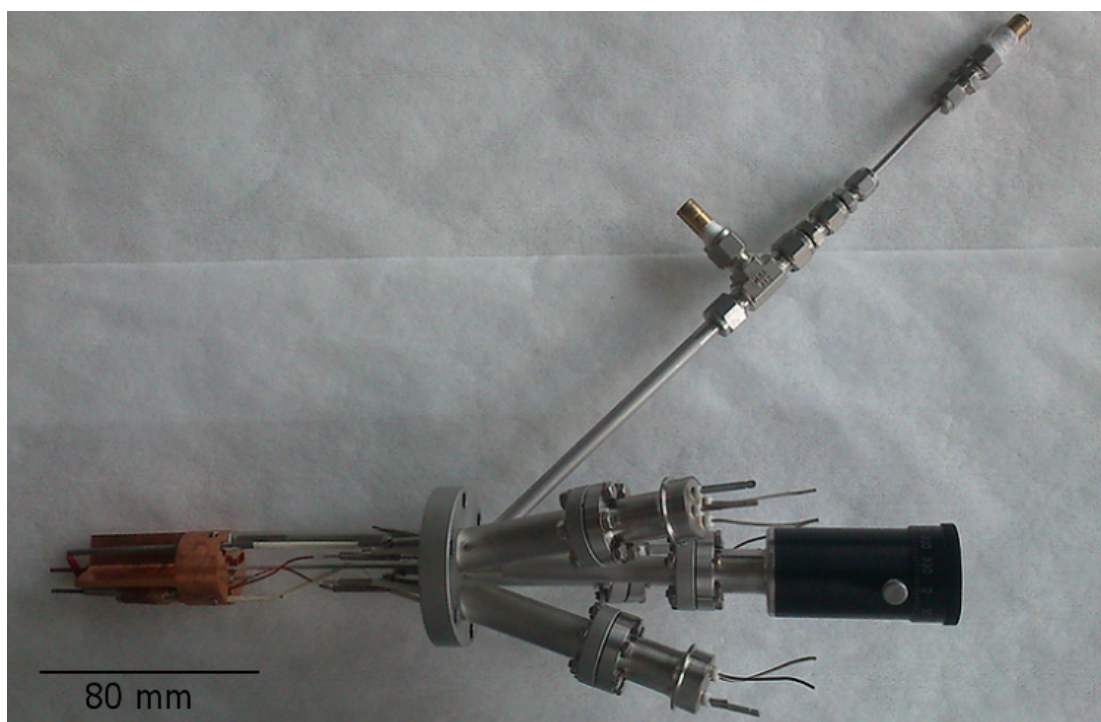
Další částí sestavy pro ohřev materiálu je píčka. Tato měděná válcová nádoba zprostředkovává přenos tepla ze žhavení na PBN kalíšek. Do žlábků na spodní části píčky je přiveden termočlánek.

PBN kalíšek slouží jako zásobník deponovaného materiálu v průběhu depozice. PBN (*"pyrolytic boron nitride"*) je vysoce homogenní materiál. Jeho vysoká tepelná vodivost, nízká teplotní roztažnost a vysoká chemická stabilita¹⁰ jsou ideální vlastnosti pro použití při napařování organických materiálů, protože nehrozí jejich kontaminace nežádoucími prvky [25].

Ukázalo se, že pro zvýšení rychlosti přenosu tepla mezi píčkou a PBN kalíškem je vhodné mezi tyto dvě části umístit kov s nízkou teplotou tání. Pro tuto celou bylo použito indium¹¹. Tato skutečnost bude diskutována v dalším textu (viz. odstavec 4.3).

Na vrchní stranu píčky je umístěn kolimátor z nerezové oceli, který zajišťuje prostorové omezení svazku.

Reálná podoba autorem sestavené efuzní cely je zobrazena na obrázku 15.



Obrázek 15: Fotografie sestavené trojkomorové nízkoteplotní efuzní cely vhodné pro napařování organických materiálů.

¹⁰Výrobce udává chemickou inertnost až do teplot 850 °C [25].

¹¹Teplota tání india je 156,6 °C [26].

4.3 Měření teplotních charakteristik

Po sestavení efuzní cely byly proměřeny její teplotní charakteristiky. Zde bylo důležité kalibrovat teplotu žhavení s teplotou PBN kalíšku. Proto bylo nutné proměřit tyto charakteristiky v několika krocích.

První fází bylo nalezení vhodné délky a tvaru wolframového vlákna tak, aby se jeho žhavením dala ohřát píčka na více jak 300 °C.

Maximální proud, který mohl protékat wolframovým vláknem byl $I = 1,9$ A. Při vyšších hodnotách protékajícího proudu by mohlo dojít k prasknutí vlákna. Tato skutečnost se potvrdila i experimentálně, kdy při hodnotách přesahujících $I = 2$ A došlo při následném vystavení vlákna atmosferickému tlaku a opětovnému žhavení v UHV k prasknutí. V následujících měřeních byly tedy hodnoty proudu rovny 1,6 A, 1,7 A, 1,8 A nebo 1,9 A.

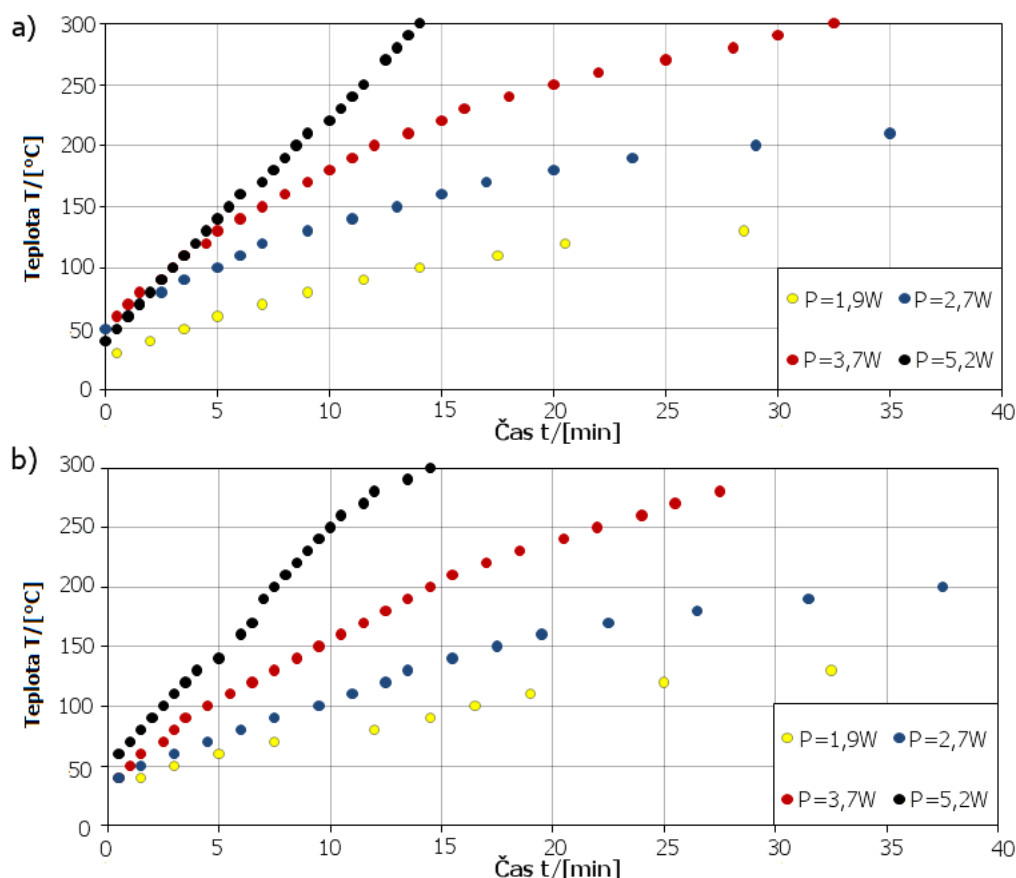
Nejprve bylo použito přímé vlákno délky 5 mm a průměru $d = 130$ μ m. Získaný výkon byl však menší než $P = 3$ W a nejvyšší dosažená teplota byla přibližně $T = 200$ °C. Proto bylo snahou najít typ a tvar vlákna tak, aby se zvýšil jeho odpor (respektive výkon).

Ukázalo se, že není možné k vodičům přibodovat vlákno s průměrem větším než zvolených $d = 130$ μ m. Z tohoto důvodu byla snaha, v omezeném prostoru mezi žhavením a spodní stranou pícky, nainstalovat vlákno co největší délky. Nejlepším řešením se ukázalo být vlákno namotané do formy cívky s pěti závity. Takto namotané vlákno bylo dlouhé přibližně 12 mm a nejvyšší výkon dosažený v obvodu vzrostl až na $P = 4,5$ W při proudu $I = 1,8$ A. Výkon větší než $P = 3,5$ W byl dostatečný k zahřátí pícky nad teplotu $T = 300$ °C.

Instalování žhavicího vlákna ve formě cívky s sebou však přineslo konstrukční problém. Prostor mezi šrouby, na kterých je vlákno nabodováno, a spodní stranou pícky je přibližně 2,5 mm, přičemž namotané vlákno má průměr 2 mm. Při zahřívání se vlákno roztahuje, čímž pravděpodobně dochází ke styku vlákna s měděnou píckou. Následný zkrat a výrazná ztráta výkonu vede k nutnosti výměny vlákna. Z tohoto důvodu by bylo vhodné vyrobit novou píčku s rozšířeným prostorem pod dnem pícky. Tímto konstrukčním zásahem by se pravděpodobně omezilo zkratování vlákna (respektive ztráta výkonu). Zároveň by tato úprava umožnila instalovat žhavicí vlákno s větším průměrem, což by mohlo výrazně zrychlit proces ohřevu pícky na potřebnou teplotu.

Po instalování vhodného žhavicího vlákna byla proměřena teplotní charakteristika žhavení efuzní cely. Bylo nutné proměřit dobu ohřevu žhavení¹² (respektive spodní strany pícky) v závislosti na výkonu vlákna a použití chlazení. Teplotní závislost s použitím chlazení efuzní cely je vynesena v grafu na obrázku 16a). Teplotní závislost bez použití chlazení efuzní cely je vynesena v grafu na obrázku 16b). Hodnoty na osách v grafech teplotních charakteristik jsou vyneseny ve stejném měřítku. Z grafů je patrné, že chlazení má na dobu ohřevu žhavení (respektive ohřevu spodní strany pícky) minimální vliv.

¹²Žhavením je zde myšlena oblast mezi žhavicím vláknem a spodní stranou pícky, na kterou je přiveden termočlánek snímající tuto teplotu (viz. obrázek 14a)).

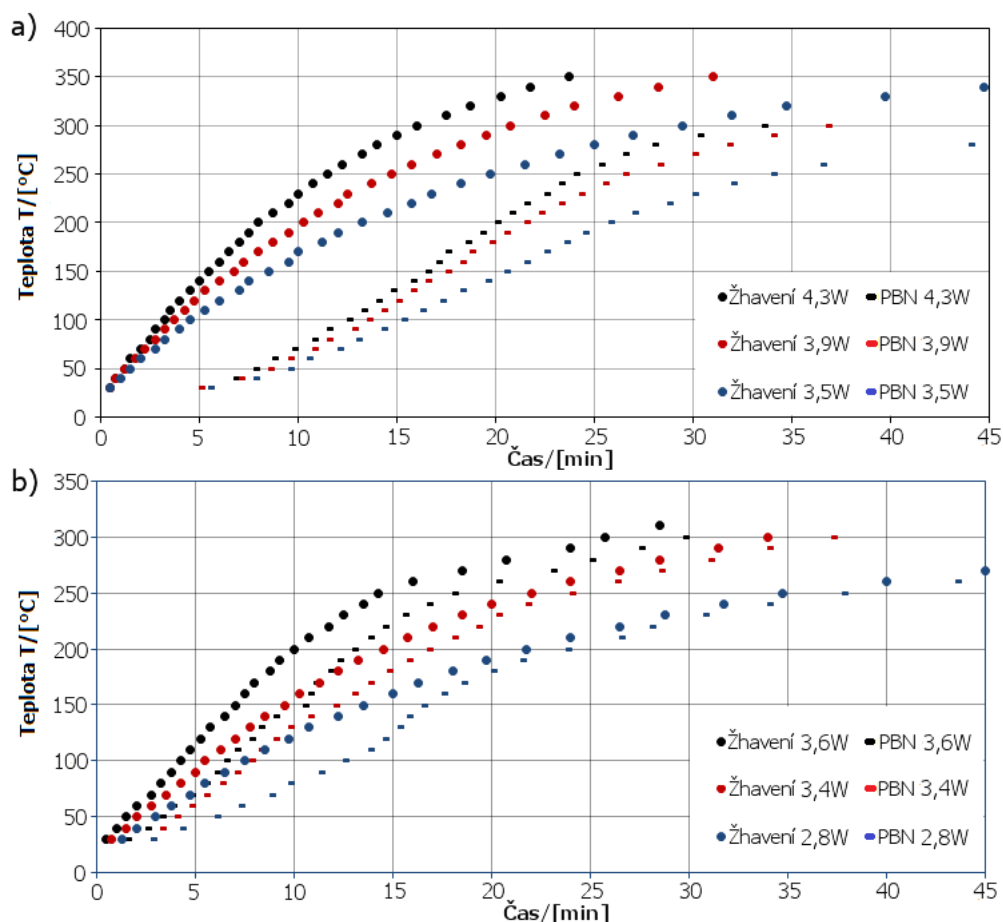


Obrázek 16: Doba zahřívání žhavení v efuzní cele pro různé výkony a) s použitím chlazení, b) bez použití chlazení.

Další snahou bylo zjistit závislost mezi ohřevem spodní strany píčky, kde byl umístěn termočlánek, a teplotou uvnitř PBN kalíšku, kde je při depozici umístěn deponovaný materiál. Při tomto měření byla měřena teplota žhavení termočlánekem umístěným ze spodní strany píčky a současně byla měřena teplota PBN kalíšku termočlánekem, vyvedeným z vedlejší větve napařovací části. Bylo tak dosaženo okamžitého porovnání mezi oběma teplotami. Teplotní závislost ohřevu píčky a PBN kalíšku je vynesena v grafu na obrázku 17a). Z grafu je vidět, že prodleva mezi ohřevem PBN kalíšku a píčkou je při nižších teplotách přibližně pět minut a se zvyšující se teplotou se zvětšuje až na patnáct minut.

Pro omezení prodlevy mezi ohřevem píčky a PBN kalíšku bylo mezi tyto dvě části vsazeno indium. Tímto způsobem se zrychlil přenos tepla mezi píčkou a PBN kalíškem a prodleva mezi ohřevy zmíněných částí se minimalizovala na sekundy až jednotky minut. Teplotní závislost mezi ohřevem píčky a PBN kalíšku po použití india je vynesena v grafu na obrázku 17b). V grafu na obrázku 18a) je vynesena tato závislost pro stejný výkon a je z něj jasné patrné, že použití india je velmi výhodné.

Vysvětlení tohoto zefektivnění je pravděpodobně takové, že při relativně nízkých teplotách dochází k největšímu přenosu tepla vedením. Vedení tepla mezi píčkou a PBN kalíškem je však omezeno jak nerovnostmi jejich povrchů, což vede ke snížení povrchu

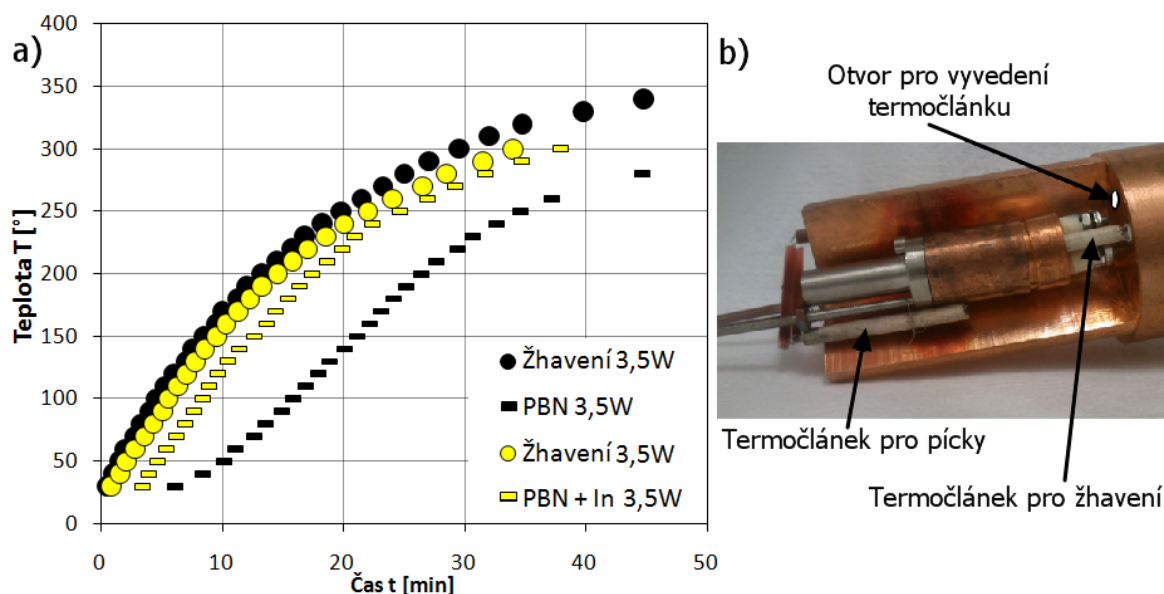


Obrázek 17: a) Porovnání doby ohřevu píčky a PBN kalíšku. b) Porovnání doby ohřevu píčky a PBN kalíšku po přidání india mezi tyto části.

stykových ploch, tak nízkým tlakem, který znemožňuje přenos tepla prostřednictvím částic v atmosféře. Použitím tekutého india dojde k zaplnění mezer vzniklých nerovnostmi a vytvoří se souvislá vrstva schopná přenášet teplo.

Původní snahou bylo určit závislost doby ohřevu mezi píčkou a PBN kalíškem při daném výkonu. V průběhu depozice by pak bylo možné kontrolovat teplotu uvnitř PBN kalíšku ze znalosti teploty píčky. Tento přístup se však ukázal nespolehlivý ze dvou důvodů:

1. Čas potřebný k ohřevu píčky na určitou teplotu při stejném výkonu byl výrazně ovlivněn počáteční teplotou píčky. Rozdíl deseti stupňů, při začátku ohřevu, ovlivnil dobu zahřívání o 6 minut. Zrychlením přenosu tepla mezi píčkou a PBN kalíškem došlo k přiblížení křivek ohřevu v grafu na obrázku 17b).
2. Při žhavení vlákna docházelo při teplotách kolem $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ k mírnému zvýšení napětí (řádově o desetiny voltů), čímž se zvýšil výkon a bylo složité včas zareagovat na tuto změnu a snížením proudu regulovat výkon na počáteční hodnotu.



Obrázek 18: a) Porovnání rychlosti ohřevu žhavení a PBN kalíšku při výkonu žhavicího vlákna 3,5 W. Černě jsou vyneseny rychlosti bez použití india (In). Žlutě jsou vyneseny rychlosti při použití india. b) Detailní pohled na část pro ohřev materiálu s termočlánekem pro kontrolu teploty PBN kalíšku vyvedeným z vedlejší komory.

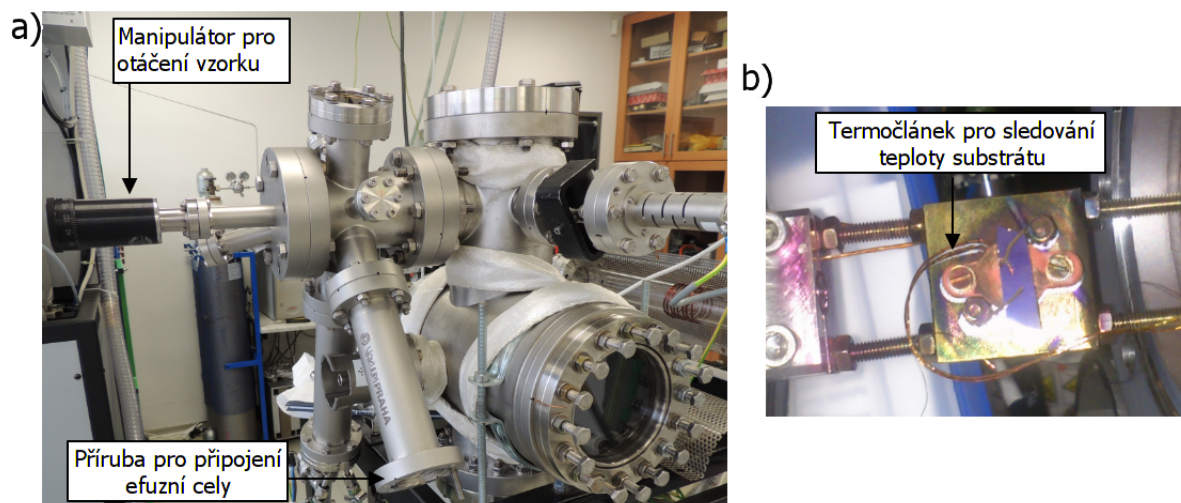
Vzhledem k tomu, že je při depozici nutné udržovat teplotu v rozmezí přibližně čtyř stupňů, jsou obě tyto omezení dosti významné. Jako nejlepší řešení se ukázalo vyvést termočlánek z vedlejší komory a připojit jej na vnější stěnu pícky, jak ukazuje fotografie 18b). Teplota získaná tímto termočlánekem je přibližně stejná jako uvnitř PBN kalíšku. Tímto způsobem kontroly teploty se však omezí možnosti použití cely, neboť je takto možné používat pouze dvě komory. Proto by bylo vhodné vyvrtat do jednotlivých komor další otvory, kterými by se termočlánky vyvedly k bočním stěnám jednotlivých pícek. Místo vhodné pro vyvedení termočládku na vnější stěnu pícky je zaznačeno na obrázku 18b).

Dalším technickým problémem je uzavření prostoru žhavicího vlákna. Po vložení cely do vakuového systému a následném vyčerpání, pravděpodobně zůstává v prostoru žhavení vzduch. Společně s desorbci molekul z vlákna vzniká v prostoru žhavení uzavřená atmosféra, která přispívá k degradaci vlákna a tím ke snížení jeho životnosti. Vytvořením odtokové díry v prostoru žhavení by se tento problém dal redukovat, protože by uzavřený vzduch (potažmo desorbované molekuly) mohl při čerpání komory unikat.

Desorbce molekul popsaná výše je další komplikací při případné depozici. Desorbci molekul z rozžhaveného vlákna dojde ve vakuovém systému ke zvýšení tlaku. V testovací komoře, kde probíhala měření a depozice, byl tlak obvykle $P = 10^{-5}$ Pa. Po rozžhavení vlákna na teplotu přibližně $T = 150^\circ\text{C}$, došlo k náhlému zvýšení tlaku na hodnoty $P = 5 \cdot 10^{-4}$ Pa. Z tohoto důvodu bylo před depozicí vlákno rozžhaveno na teplotu $T = 200^\circ\text{C}$, při které se předpokládala desorbce většiny molekul z vlákna. Po tomto kroku se nechala komora opět vyčerpávat na tlak $P = 10^{-5}$ Pa. Tímto postupem se efektivně docílilo stabilizace tlaku při následné depozici.

4.4 Depozice organických molekul

Depozice PTCDI-C8 probíhaly, jakožto i měření teplotních charakteristik efuzní cely, v laboratoři Ústavu fyzikálního inženýrství. K tomuto účelu byla vyhrazena testovací vakuová komora, ke které byla připojena turobomolekulární a rotační vývěva. Fotografie testovací vakuové komory je na obrázku 19a). Nejnižší dosažitelný tlak v komoře se pohyboval kolem $P = 10^{-6}$ Pa, ale v průběhu měření byl obvykle o řád vyšší.



Obrázek 19: a) Fotografie testovací vakuové komory, ve které byla prováděna měření a depozice. b) Fotografie uchycení vzorku k manipulátoru.

Jako substrát pro depozice organických molekul byl použit křemík Si(111) s nativní vrstvou SiO_2 . Křemíkový substrát byl připevněn na manipulátor. Zároveň k němu byl připevněn termočlánek typu K, vyvedený z komory, jak lze vidět na fotografii na obrázku 19b). Substrát byl před každou depozicí žíhán po dobu 12 hodin při teplotě přibližně $T = 450^\circ\text{C}$. Žíháním mělo být docíleno vyčištění vzorku od adsorbovaných molekul (převážně vody). Po procesu žíhání se nechal substrát vychladnout na teplotu, při které probíhaly jednotlivé depozice.

Po zchladnutí substrátu na požadovanou teplotu následoval proces samotné depozice. Nejprve bylo provedeno zahřátí pícky na teplotu vypařování PTCDI-C8, tedy na teplotu přibližně $T = 300^\circ\text{C}$, v závislosti na podmínkách jednotlivých depozice. Po zahřátí na danou teplotu byla otevřena clona, čímž došlo k napaření PTCDI-C8 na substrát. Po ukončení depozice byla clona opět zavřena a substrát se nechal zchladnout na teplotu $T = 60^\circ\text{C}$.

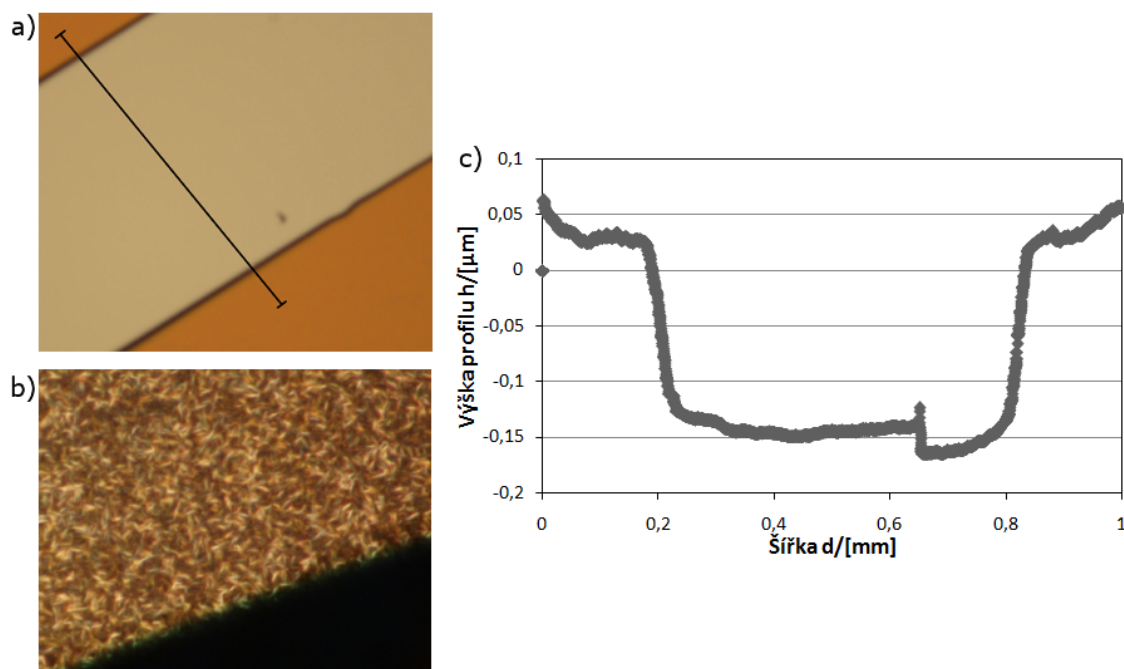
• První depozice

První depozice proběhla pro ověření funkčnosti efuzní cely a pro získání představy o charakteru PTCDI-C8. Tlak ve zkušební komoře byl na začátku zahřívání efuzní cely $P = 10^{-5}$ Pa. V průběhu zahřívání pícky docházelo k pomalému zvyšování tlaku až na hodnotu $P = 5 \cdot 10^{-4}$ Pa, na níž se ustálil. Zvýšení tlaku bylo pravděpodobně způsobeno již zmíněnou desorbí molekul při žhavení (viz kapitola 4.3). Teplota substrátu byla udržována na hodnotě $T = 150^\circ\text{C}$ a doba

depozice činila $t = 15$ min. Během samotné deposice kolísala teplota píčky v rozmezí od $T = 298^\circ\text{C}$ do hodnoty $T = 304^\circ\text{C}$. Po ukončení deposice byl vypnut ohřev cely i substrátu a substrát byl nechán zchladnout.

Ukázalo se, že PTCDI-C8 pokryla v průběhu deposice nejen substrát, ale i stěny komory. Jednalo se o vrstvu s červeným odstínem, kterou bylo možno setřít utěrkou s použitím isopropylalkoholu.

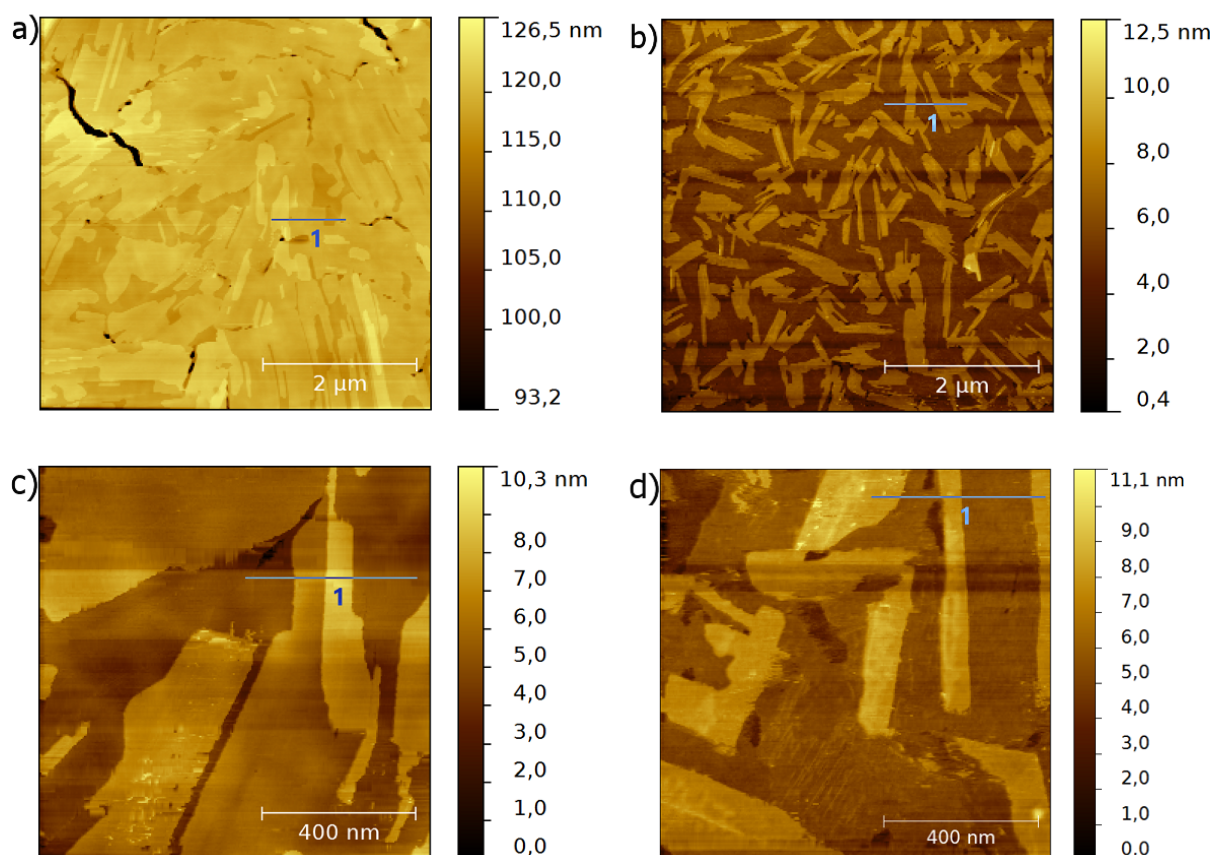
Po vyjmutí z manipulátoru byl vzorek proměřen na profilometru Bruker Dektak XT. Ukázalo se, že v prostoru, ve kterém byl vzorek přichycen pacičkami k manipulátoru není nadeponována žádná vrstva PTCDI-C8 a proto tento prostor sloužil jako referenční bod pro změření výšky vzniklé vrstvy. Obraz rozhraní pořízený optickým mikroskopem je na obrázku 20a). Získaný profil je vynesena v grafu na obrázku 20c). Vrstva byla vysoká $h = 170$ nm. Uvážíme-li rozměry molekuly PTCDI-C8 ($3 \times 1,7 \times 0,9$ nm³, viz kapitola 1.2.2), získáme tři možné počty monovrstev 60, 100 a 195 ML v závislosti na natočení molekul. Nejpravděpodobnější se jeví varianta (s ohledem na studie shrnuté v kapitole 2.3), že molekuly se uspořádávají kolmo k substrátu. Tedy, že vrstva byla vysoká 60 ML. Na optickém mikroskopu byl dále pořízen snímek rozhraní v režimu temného pole. Jak je vidět na obrázku 20b), shlukuje se PTCDI-C8 do domén po celém povrchu vzorku.



Obrázek 20: a) Fotografie rozhraní PTCDI-C8 vrstvy (na obrázku žlutě) a křemíku pořízená optickým mikroskopem. Naznačená úsečka vyznačuje měřený profil. b) Fotografie rozhraní PTCDI-C8 vrstvy a křemíku pořízená optickým mikroskopem v režimu temného pole. c) Profil měřené části vzorku.

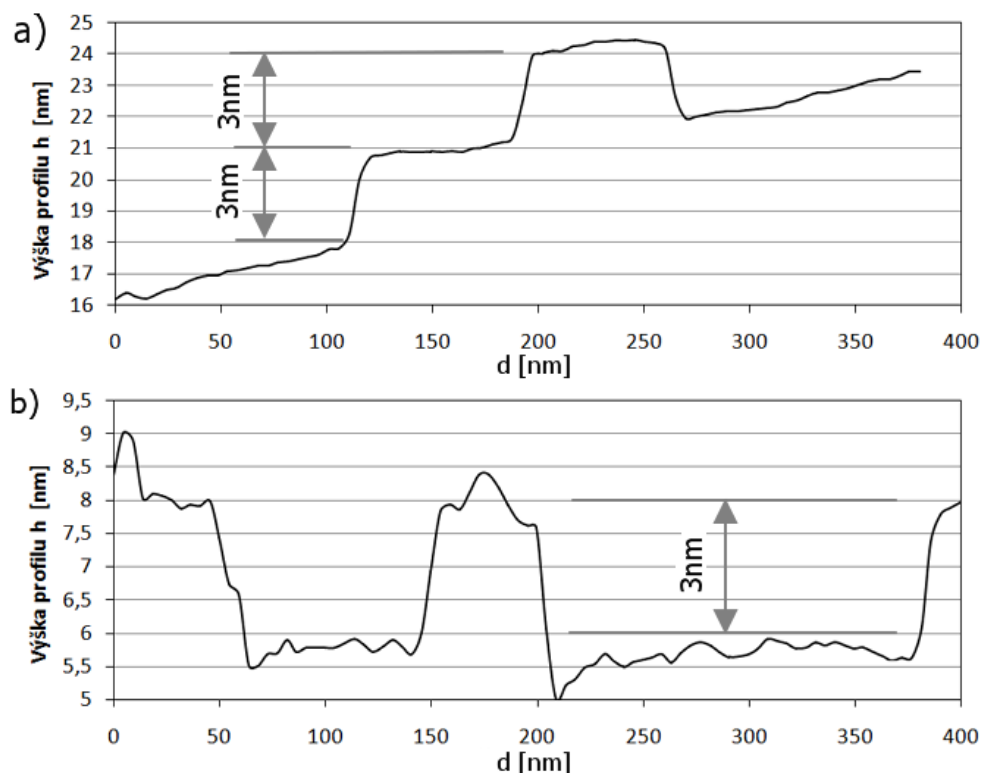
Vrstva PTCDI-C8 byla dále studována na AFM. Pro měření byl použit kontaktní mód mikroskopu a hrot typu CSG 10. Měření zorného pole $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ je zobrazeno na obrázku 21a). Měření zorného pole $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ je zobrazeno na obrázku 21c). Na snímcích je pravděpodobně vidět několik horních monovrstev PTCDI-C8. Profil

části povrchu, na obrázku 21c) označený úsečkou 1, je vyneseno v grafu na obrázku 22a). Jednotlivé vrstvy mají výšku ~ 3 nm, což by odpovídalo uspořádání molekul kolmo k povrchu, jak je naznačeno výše. Z uvedených dat bylo vyvozeno, že PTCDI-C8 při depozici roste vrstva po vrstvě. Tento závěr je ve shodě s výsledky studií uvedených v kapitole 2.3.



Obrázek 21: AFM měření vrstvy PTCDI-C8 na Si(111) s nativní vrstvou SiO₂. a) Doba depozice $t = 15$ min, teplota substrátu $T = 150$ °C. b) Doba depozice $t = 1$ min, teplota substrátu $T = 150$ min. Velikost skenované oblasti $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. c) Doba depozice $t = 15$ min, teplota substrátu $T = 150$ °C. d) Doba depozice $t = 1$ min, teplota substrátu $T = 150$ °C. Velikost skenované oblasti $1 \times 1 \mu\text{m}^2$.

Vrstva PTCDI-C8 byla dále studována v SEM zařízení. Při použití urychlovacího napětí 30 kV nebyla viditelná jakákoli struktura na povrchu vzorku. Při urychlovacím napětí 5 kV se podařilo zaznamenat strukturu povrchu velmi podobnou struktuře získané pomocí AFM, jak je patrné ze snímku na obrázku 23a). Výsledný kontrast je však poměrně malý. Bylo by vhodné provést doplňující měření na SEM zařízení pro urychlovací napětí 1 kV a pro nižší rastrovací rychlost.

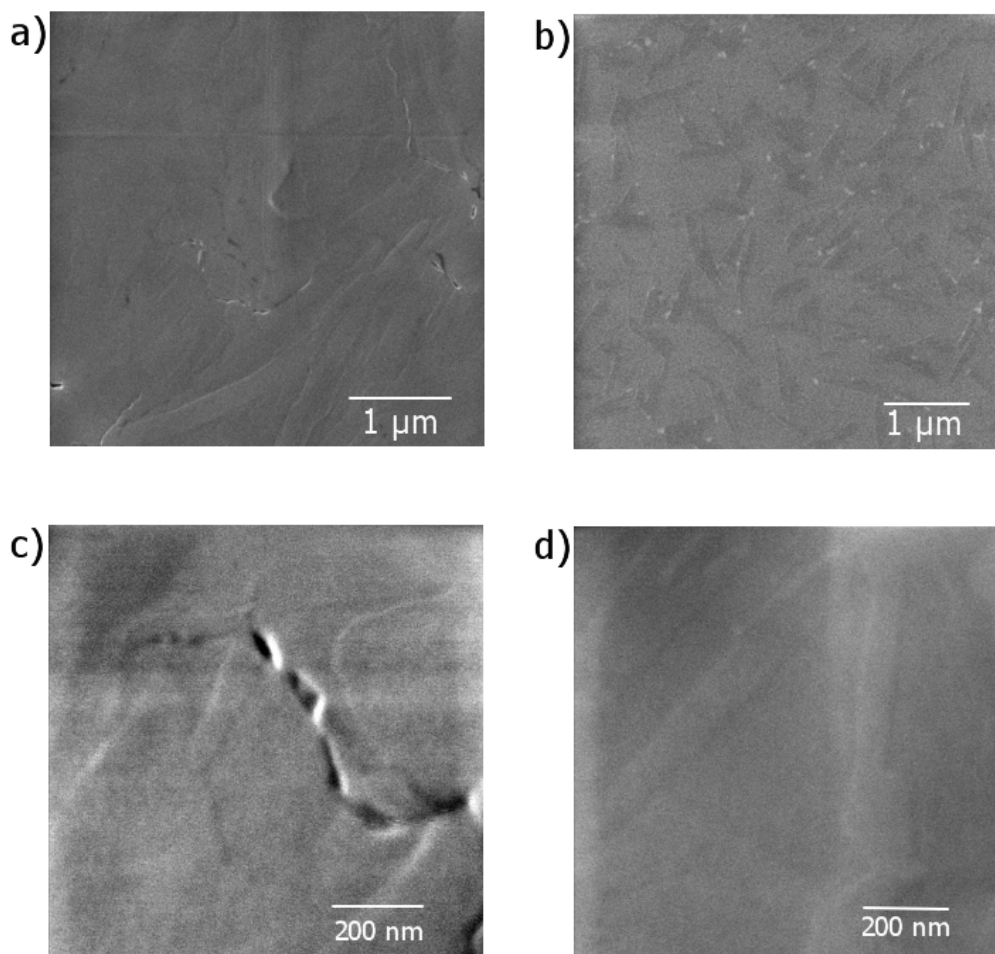


Obrázek 22: Profil horních monovrstev vrstvy PTCDI-C8 deponované při teplotě substrátu $T = 150^\circ\text{C}$ a při době depozice a) 15 min, b) 1 min.

• Druhá depozice

Druhá depozice PTCDI-C8 probíhala v podmínkách stejných jako depozice první s tím rozdílem, že doba depozice byla zkrácena na 1 minutu. Tlak v komoře byl tentokrát stabilní po celou dobu ohřevu píčky i samotné depozice, a to $P = 5 \cdot 10^{-4}$ Pa. Teplota substrátu byla udržována na hodnotě $T = 150^\circ\text{C}$ a teplota píčky v průběhu depozice kolísala mezi teplotami $T = 298^\circ\text{C}$ a $T = 302^\circ\text{C}$. Vrstvu PTCDI-C8 deponovanou za těchto podmínek nebylo možné proměřit na profilometru, neboť na vzorku nebylo žádné pozorovatelné rozhraní. Měřením na AFM v kontaktním módu s použitím hrotu CSG 10 se podařilo získat morfologii povrchu vrstvy. Snímek z AFM pro velikost zorného pole $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ je na obrázku 21b), pro velikost zorného pole $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ pak na obrázku 21d). Na obou snímcích je zřetelná podobnost se snímky z první depozice. Z morfologie povrchu je možné opět usuzovat na růst PTCDI-C8 vrstvy po vrstvě s charakteristickým tvořením domén při zaplňování monovrstvy. Výška jednotlivých monovrstev byla ~ 3 nm, jak ukazuje profil části povrchu na obrázku 22b). Místo měření profilu je zaznačeno v obrázku 21d) úsečkou označenou 1. Toto měření potvrdilo výsledek získaný u první depozice.

Struktura povrchu na snímcích získaných ze SEM zařízení, odpovídá struktuře získané pomocí AFM, jak ilustruje obrázek 23d). Nicméně kontrast je výrazně slabší, podobně jako při první depozici.



Obrázek 23: SEM měření vrstvy PTCDI-C8 na Si(111) s nativní vrstvou SiO₂. a) Doba depozice $t = 15$ min, teplota substrátu $T = 150$ °C. b) Doba depozice $t = 1$ min, teplota substrátu $T = 150$ °C. Velikost skenované oblasti $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. c) Doba depozice $t = 15$ min, teplota substrátu $T = 150$ °C. d) Doba depozice $t = 1$ min, teplota substrátu $T = 150$ °C. Velikost skenované oblasti $1 \times 1 \mu\text{m}^2$.

• Třetí depozice

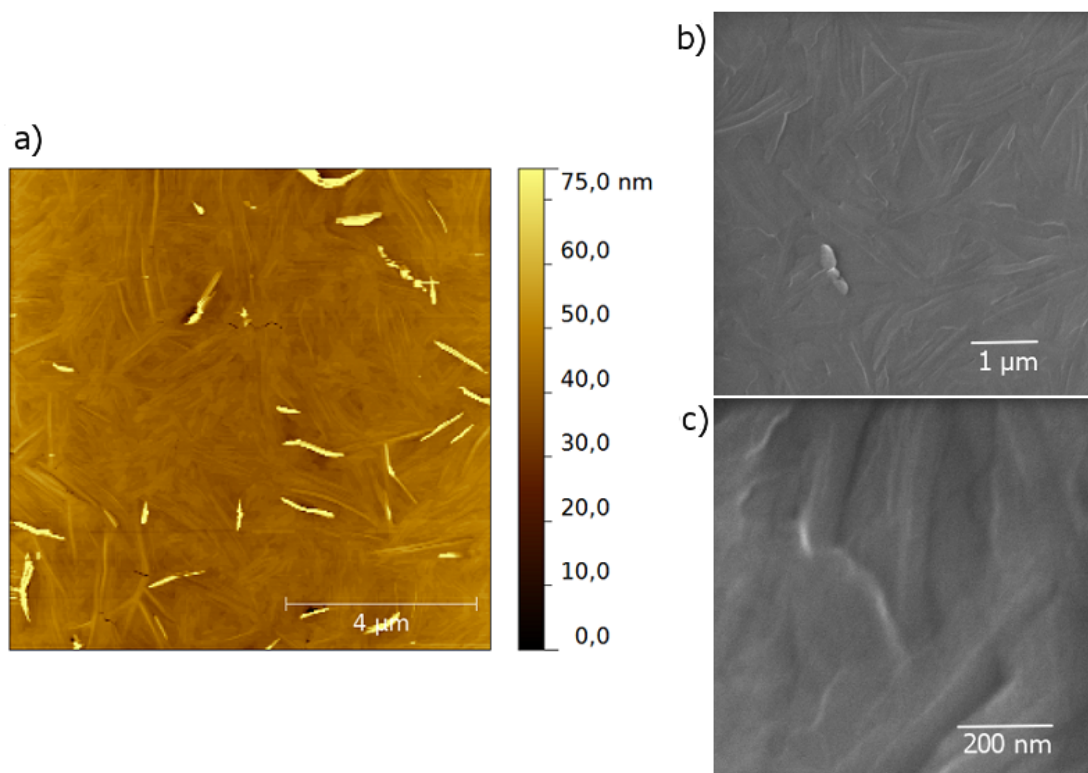
Cílem třetí depozice bylo nastínit závislost růstu vrstvy PTCDI-C8 na teplotě substrátu. Teplota substrátu tak byla snížena na hodnotu $T = 100$ °C. Tlak v komoře byl $P = 5 \cdot 10^{-4}$ Pa, přičemž byl po celou dobu depozice stabilní. Teplota píčky během depozice kolísala mezi teplotami $T = 298$ °C a $T = 304$ °C.

Rozhraní mezi povrchem substrátu a vrstvou PTCDI-C8 se podařilo proměřit na profilometru. Výška vrstvy byla 100 nm, což odpovídá výšce přibližně 30 ML (viz diskuze v odstavci První depozice). Vzorek s vrstvou PTCDI-C8 byl proměřen na AFM. Jak lze vidět z měření na obrázku 24a) PTCDI-C8 vytváří na povrchu vzorku jehlice délky jednotek mikrometrů a šířce několika desítek nanometrů. Výška těchto struktur se nepodařila změřit.

Tento vzorek byl dále proměřen pomocí metody SEM. Získané snímky jsou na obrázcích 24b) pro zorné pole $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ a 24c) pro zorné pole $1 \times 1 \mu\text{m}^2$. Na těchto snímcích jsou opět vidět charakteristické jehlicovité struktury vrstvy PTCDI-C8.

Při porovnání obrázků 24b,c) se snímky z obrázku 23 je patrné, že při stejném nastavení SEM zařízení, mají snímky vrstvy PTCDI-C8, při teplotě substrátu $T = 100^\circ\text{C}$, větší kontrast a struktury jsou snadněji rozpoznatelné.

Od teploty píčky přibližně $T = 230^\circ\text{C}$ začal výkon vlákna (respektive napětí a proud v obvodu) oscilovat kolem určité zvyšující se střední hodnoty. Tato střední hodnota v podstatě lineárně rostla, takže teplota píčky oscilovala pouze zanedbatelně v řádu desetin stupně. Tento jev mohl být způsoben dotykem žhavicího vlákna se dnem píčky, což bylo diskutováno v odstavci 4.3.



Obrázek 24: Vrstva PTCDI-C8 deponovaná při teplotě substrátu $T = 100^\circ\text{C}$. a) Měření povrchu v kontaktním módu AFM. b,c) Měření pomocí metody SEM při urychlovacím napětí 5 kV.

Výše popsany problém s výkonem žhavicího vlákna měl pravděpodobně za následek znehodnocení čtvrté depozice. Čtvrtá depozice probíhala při teplotě substrátu $T = 60^\circ\text{C}$. Po začátku depozice při teplotě $T = 301^\circ\text{C}$ náhle vzrostl výkon na dvojnásobek normální hodnoty, tedy na hodnotu $P = 8\text{ W}$. Následkem prudkého zvýšení výkonu se během dvaceti vteřin zvýšila teplota píčky na $T = 325^\circ\text{C}$. V tomto okamžiku byla zavřena clona a přerušena depozice. Snížením tekoucího proudu bylo dosaženo snížení výkonu na běžnou hodnotu $P = 3,9\text{ W}$. Po ochlazení píčky na teplotu $T = 301^\circ\text{C}$ byla znovu spuštěna depozice (otevřením clony), která pokračovala po dobu $t = 4,5\text{ min}$. Po vytažení vzorku z vakuové komory se zjistilo, že jsou na vzorku nadeponovány v podstatě dvě vrstvy a proto se od dalšího měření upustilo.

Závěr

Obsahem této bakalářské práce bylo sestavení nízkoteplotní trojkomorové efuzní cely vhodné pro napařování organických polovodičových materiálů. Byla provedena měření pro získání teplotních charakteristik v průběhu zahřívání efuzní cely. Dále byla provedena depozice polovodičového organického materiálu PTCDI-C8 na křemíkový substrát. Morfologie povrchu vzniklé vrstvy byla studována pomocí metod AFM a SEM.

V úvodní kapitole byly představeny vodivé organické materiály používané v polovodičových součástkách jako jsou organické LED diody a organické FET tranzistory. Byl nastíněn mechanismus přenosu náboje po molekulovém řetězci organických látek a jeho ovlivnění druhem vazby mezi jednotlivými atomy.

V úvodu druhé kapitoly byly představeny metody využívající se k vytváření tenkých vrstev organických materiálů. Byla popsána metoda rotačního lití a metoda molekulární svazkové epitaxe, kterou byly vytvářeny tenké vrstvy PTCDI-C8 v praktické části práce. Součástí kapitoly bylo shrnutí dosavadních výsledků v oblasti depozice organických polovodičových materiálů a jejich implementace do polovodičových součástek. Byly uvedeny výsledky depozice PTCDI-C8 na různé typy substrátů včetně studovaného selektivního růstu a rovněž popsány základní principy metod analýzy povrchů AFM a SEM.

Ve třetí kapitole byly popsány základní organické polovodičové součástky, jejich základní architektura a principiálně i způsob fungování.

Čtvrtá kapitola je věnována praktické části bakalářské práce. V úvodu kapitoly byly popsány jednotlivé části realizované efuzní cely. Byl zde detailně popsán postup při výběru vhodného žhavicího vlákna. Následně byla vyhodnocena jednotlivá měření teplotních charakteristik při ohřevu pícky, respektive PBN kalíšku, ve kterém je v průběhu depozice umístěn deponovaný materiál. Byly měřeny rychlosti ohřevu pícky a PBN kalíšku v závislosti na výkonu žhavicího vlákna. Ukázalo se, že chlazení efuzní cely mělo minimální vliv na dobu ohřevu pícky. Dále bylo zjištěno, že je vhodné mezi pícku a PBN kalíšek vložit tekutý kov - indium. Použití india vedlo ke zrychlení přenosu tepla mezi těmito dvěma částmi, čímž bylo docíleno snadnější regulace teploty. Byly navrženy některé konstrukční úpravy efuzní cely, které by mohly vést k zefektivnění celého procesu depozice, zejména pak kontroly teploty uvnitř PBN kalíšku.

Po optimalizaci ohřevu pícky a PBN kalíšku byly provedeny depozice PTCDI-C8 na křemíkový substrát. Byla sledována závislost růstu vrstvy PTCDI-C8 na teplotě substrátu a na době depozice. Struktura povrchů vzniklých vrstev byla studována metodami AFM a SEM. Bylo zjištěno, že PTCDI-C8 roste způsobem vrstvy po vrstvě, což je ve shodě s výsledky popsány v rešeršní studii, a při zaplňování jednotlivých monovrstev tvoří charakteristické domény. Na základě měření výšky jednotlivých monovrstev byly popsány možné orientace molekul ve vzniklé vrstvě. Nebylo však možné určit, která z těchto orientací převládá.

V návaznosti na tuto práci se další studium zaměří na zpřesnění závislosti výšky vrstev na době depozice a teplotě substrátu. Získané výsledky by mohly přinést možnost provádět selektivní růst organických materiálů, s čímž je spojena i výroba polovodičových součástek.

Literatura

- [1] J. Prokeš, S. Nešpůrek, and J. Stejskal. "Vodivé polymery: Inteligentní materiály pro nové století," *Vesmír*, vol. 80, pp. 35-38, 2001.
- [2] S. Nešpůrek and M. Matyáš. "Elektroaktivní organické materiály," *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, vol. 51, no.1, pp. 31-50, 2006.
- [3] Elektrická vodivost organických látek [online], 2013. ISSN 1802-4564. Dostupné z: <http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2013/Cislo.2013>
- [4] J. Vacík. *Přehled středoškolské chemie*, 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1990. ISBN 80-042-2463-6.
- [5] L. Kalvoda, and A.S. Parshin. *Vybraná témata z fyziky povrchů: vícevrstevné systémy a tenké organické filmy*, Vyd. 1. Praha: ČVUT, Jaderná a fyzikálně inženýrská fakulta, 2000. ISBN 80-010-2217-X.
- [6] A. Heeger, Nobel Lecture: Semiconducting and metallic polymers [online], 2000. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2000/heeger-lecture.pdf
- [7] T.N. Krauss, "Directed Self-Assembly of Organic Semiconductors in Different Dimensionalities," Diplomová práce, Stuttgart, 2009.
- [8] M. Yoosuf Ameen et al. "Linearly polarized emission from PTCDI-C8 one-dimensional microstructures," *Organic Electronics*, vol. 14, no. 2, pp. 554-559, 2013
- [9] W. Wang et al. "Control over Patterning of Organic Semiconductors: Step-Edge-Induced Area-Selective Growth," *Advanced Materials*, vol. 21, no. 46, pp. 4721-4725, 2009.
- [10] W. Wang, and L. Chi. "Area-Selective Growth of Functional Molecular Architectures," *Accounts of Chemical Research*, vol. 45, no. 10, pp. 1646-1656, 2012.
- [11] (© 2014). OME: Organic Material Effusion Cell. *MBE-komponenten* [online]. Dostupné z: <http://www.mbe-komponenten.de/products/mbe-components/organic-evaporators/ome.php>
- [12] K. Lament, P. Mazur, S. Zuber, and A. Ciszewski. "PTCDI-C8 Adsorption on Si(100)," *Acta Physica Polonica A*, vol. 124, no. 5, pp. 775-776, 2013.
- [13] V.L. Mironov, Fundamentals of scanning probe microscopy [online]. Dostupné z: <http://ipmras.ru/UserFiles/publications/mironov/Fundamentals.SPM.pdf>
- [14] JEOL Guide to Scanning Microscope Observation. *JEOL USA Electron Optics*

Documents [online]. Dostupné z: [http://www.jeolusa.com/ RESOURCES/ ElectronOptics/ DocumentsDownloads/ tabid/320/Default.aspx?EntryId=1](http://www.jeolusa.com/RESOURCES/ElectronOptics/DocumentsDownloads/tabid/320/Default.aspx?EntryId=1)

[15] J. Nebesářová. *Elektronová mikroskopie pro biology*. 2001. 2014-05-24. [<http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.0.html>];

[16] E. Kolíbalová. (© 2003). Introduction to Scanning Electron Microscopy. *Ústav fyzikálního inženýrství: Fakulta strojního inženýrství* [online]. Dostupné z: http://physics.fme.vutbr.cz/files/116/Specialni%20praktika%20I%20Dvorak/SEM_2.pdf

[16] G. Horowitz. "Organic Field-Effect Transistors," *Advanced Materials*, vol. 10, no. 5, 1998.

[17] (2004). Unipolární tranzistory. J. Diviš. *SPŠE Mohelnice* [online]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/tranzistory-unip.htm>

[18] S.R. Forrest. "Ultrathin Organic Films Grown by Organic Molecular Beam Deposition and Related Techniques," *Chemical Reviews*, vol. 97, no. 6, pp. 1793-1896, 1997.

[19] B. Choudhury, "Organic light emitting devices (OLEDs) and Structurally integrated photoluminescence based chemical and biological sensors excited by OLEDs," Disertační práce, Iowa, USA, 2005.

[20] T.B. Singh, N.S. Sariciftci, J.G. Grote. "Bio-Organic Optoelectronic Devices Using DNA," *Organic Electronics: Advances in Polymer Science*, vol. 223, 2010.

[21] E. Polikarpov, and M.E. Thompson. "Achieving High Efficiency in Organic Light-Emitting Devices," *Material Matters*, vol. 2, no. 3, pp. 21-26, 2012.

[22] M. Kočer, "Optické vlastnosti organických polovodičů," Diplomová práce, Brno, 2013.

[23] S. Kowarik, A. Gerlach, and F. Schreiber. "Organic molecular beam deposition: fundamentals, growth dynamics, and in situ studies," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 20, no. 18, 2008

[24] (2008). Bezkyšlíkatá měď OF-OK® pro průmyslové aplikace. *INKOSAS* [online]. Dostupné z: <http://www.inkosas.cz/templates/bezkysslikate-elektrovodne-medene-plechy-pasy-pasky-folie-svitky.php>

[25] (2014). Pyrolytic Boron Nitride. *Morgan: Advanced material* [online]. Dostupné z: <http://www.morgantechnicalceramics.com/products-materials/about-ceramics/advanced-ceramics/pyrolytic-boron-nitride/>

[26] (2014). Indium. *Wikipedie* [online]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Indium>