

Využití polymerních rezistů pro přípravu mikro a nanostruktur pomocí elektronové litografie

Jaroslav Navrátil

Bakalářská práce
2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Jaroslav Navrátil
Osobní číslo: T17044
Studijní program: B2808 Chemie a technologie materiálů
Studijní obor: Materiálové inženýrství
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Využití polymerních rezistů pro přípravu mikro a nanostruktur pomocí elektronové litografie

Zásady pro vypracování

Polymerní rezisty jsou materiály využívané při přípravě mikrostruktur a nanostruktur v elektronice. Náplní bakalářské práce bude seznámení se s principy zápisu struktur do polymerních rezistů pomocí elektronové litografie. S využitím polymerních materiálů a elektronové litografie bude připravena funkční struktura a její fyzikální vlastnosti budou následně charakterizovány vhodnými metodami (AFM, profilometrie).

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Matějka, F. Praktická elektronová litografie. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, 2013. 88 s. ISBN 978-80-87441-04-6.
2. Urbánek, M., Reliéfní struktury připravené pomocí elektronové litografie, Brno 2012, Disertační práce Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta.

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Michal Urbánek, Ph.D.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání bakalářské práce: **3. února 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 17. února 2020

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na techniku elektronové litografie a přípravu struktur v polymerním rezistu PMMA pomocí expozice elektronovým svazkem. Pozornost je věnována procesu vyvolávání rezistu a vyhodnocení struktur pomocí optického mikroskopu, mechanického profilmetru a mikroskopu atomárních sil (AFM).

Klíčová slova: Elektronová litografie, polymerní rezist, proces vyvolání, kontrast rezistu, optická mikroskopie, mechanická profilometrie, AFM

ABSTRACT

This bachelor thesis is focusing on the technique of electron-beam lithography and preparation of structures in polymer resist PMMA using electron beam exposure. Attention is paid to the process of resist development and evaluation of structures using an optical microscope, a mechanical profilometer and an atomic force microscope (AFM).

Keywords: Electron-beam lithography, polymer resist, process of resist development, contrast of resist, optical microscopy, mechanical profilometry, AFM

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Mgr. Michalu Urbánkovi, Ph.D., který mě provedl problematikou elektronové litografie, poskytl odborné rady k dané tématice a přiblížil instrumentaci použitých přístrojů.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE	12
1.1 ELEKTRONOVÝ LITOGRAF	12
1.1.1 Optické prvky elektronového litografu	12
1.1.2 Elektronové čočky.....	12
1.1.3 Apertury	13
1.1.4 Vychylování elektronové svazku	13
1.1.5 Zatemňování svazku.....	14
1.1.6 Stigmátory	14
1.2 OSTATNÍ PRVKY ELEKTRONOVÉHO LITOGRAFU	14
1.2.1 Faradayova klec	14
1.2.2 Vakuum	14
1.3 ELEKTRONOVÉ INTERAKCE S PEVNÝMI LÁTKY	15
1.3.1 Rozlišení.....	15
1.3.2 Dopředný rozptyl elektronů	15
1.3.3 Zpětný rozptyl elektronů	16
1.3.4 Sekundární elektrony	17
1.3.5 Proximity efekt.....	17
1.4 TYPY ELEKTRONOVÝCH LITOGRAFŮ.....	18
1.4.1 Litograf na konstrukční základně elektronového mikroskopu (SEM konverze).....	19
1.4.2 Jednoučelový EBL systém	19
1.5 TYPY ELEKTRONOVÝCH SVAZKŮ.....	19
1.5.1 Gaussovský svazek (Gaussian Round Beam)	19
1.5.2 Tvarovaný svazek (Variable Shaped Beam)	20
1.5.3 Rastrový a vektorový zápis struktury.....	21
2 PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU S POLYMERNÍ VRSTVOU PRO ZÁPIS	22
2.1 SUBSTRÁT	22
2.1.1 Monokrystalický křemík	22
2.2 POLYMERNÍ REZIST	23
2.2.1 Rozptyl náboje	24
2.3 POZITIVNÍ REZISTY	24
2.3.1 PMMA.....	24
2.3.2 RE-650	25
2.4 NEGATIVNÍ REZISTY	25
2.4.1 COP	25
2.4.2 SU-8	25

2.5	CITLIVOST REZISTU	26
2.6	KONTRAST REZISTU.....	26
2.7	ZPRACOVÁNÍ REZISTU	27
2.7.1	Depozice polymeru na substrát	27
2.7.2	Softbake.....	27
2.7.3	Zápis struktury	28
2.7.4	Vyvolání rezistu	28
2.7.5	Hardbake	28
II	PRAKTICKÁ ČÁST	29
3	PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU S POLYMERNÍ VRSTVOU PRO ZÁPIS	30
3.1	POUŽITÉ LÁTKY, PŘÍSTROJE A POMŮCKY	30
3.2	PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU	31
3.3	OŠETŘENÍ POLOVODIČOVÉHO SUBSTRÁTU.....	31
3.4	PŘÍPRAVA POLYMERNÍHO ROZTOKU A NANÁŠENÍ POLYMERNÍ VRSTVY	31
3.5	NANÁŠENÍ POLYMERNÍ VRSTVY NA SUBSTRÁT	31
3.6	MĚŘENÍ TLOUŠTKY POLYMERNÍ VRSTVY MECHANICKÝM PROFILOMETREM	32
4	ZÁPIS STRUKTURY ELEKTRONOVÝM SVAZKEM A NÁSLEDNÉ VYVOLÁNÍ POMOCÍ VÝVOJKY.....	34
4.1	ZÁPIS ELEKTRONOVÝM SVAZKEM	34
4.2	VYVOLÁNÍ REZISTU	35
4.3	CITLIVOSTNÍ TESTY PRO 6HMOT.% PMMA 3000RPM	35
4.4	KONTRAST U 6HM.% PMMA 3000RPM PRO VÝVOJKY N-AMYLACETÁT A MIBK:IPA 1:3	38
4.5	CITLIVOSTNÍ TESTY PRO 9HMOT.% PMMA 6000RPM	40
4.6	KONTRAST U 9HM.% PMMA 6000RPM PRO CITLIVOSTNÍ TESTY A, B, C	44
4.7	AFM – MIKROSKOP ATOMÁRNÍCH SIL	45
	ZÁVĚR	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ	54
	SEZNAM TABULEK.....	56

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá přípravou struktur v polymerním materiálu za pomoci elektronové litografie (E-Beam Lithography) pro další technologické zpracování. Elektronová litografie (EBL) je metoda využívána při přípravě mikro a nanostruktur s velmi vysokým rozlišením v řádu desítek nanometrů. Princip této metody spočívá v ozařování substrátu s naneseným polymerním rezistem, který dále netermicky interaguje s elektronovým svazkem o určitém urychlovacím napětí. Dochází k elastickým a neelastickým kolizím elektronů s rezistem, kdy elektrony předávají energii dané látce. Dojde ke vzniku latentního obrazu, který s pomocí vývojky vyvoláme a dostaneme výslednou strukturu k dalšímu využití. Elektronová litografie vznikla v šedesátých letech 20. století, kdy se objevila potřeba vytváření velmi malých a přesných struktur a s tím spojená potřeba zmenšovat elektronické součástky. První elektronové litografy vznikly úpravou z elektronových mikroskopů (SEM). Pro výzkum a vývoj různých mikro a nanostruktur se tato zařízení založená na přeměně elektronového mikroskopu používají až do dnešní doby.

Elektronová litografie je vhodnou metodou pro přípravu součástek a struktur dosahujících velikosti pod 100 nanometrů. Jedná se hlavně o integrované obvody, čipy a miniaturní senzory. Zápis elektronovým svazkem je velmi přesný a výsledky dobře replikovatelné. EBL umožňuje zápis struktur v jednovrstvém nebo vícevrstevném polymerním systému a lze tak vytvořit unikátní struktury.

S postupným rozvojem polymerních materiálů došlo k objevení polymeru PMMA (polymethylmetakrylát), který je dodnes nejvíce používaným rezistem pro EBL. Jedná se o pozitivní polymerní rezist využívaný jako maska pro substrát (nejčastěji křemík). Pro zápis je nutné nanesení polymerní vrstvy na substrát. Daný polymer je nanášen z roztoku pomocí metody spincoatingu, která zajistí rovnoměrnou tloušťku vrstvy na předem očištěném substrátu. Tloušťka rezistu závisí na rychlosti odstředění, hmotnostním zlomku polymeru a rozpouštědla. Pomocí elektronového svazku jsme schopni do takto připraveného vzorku zapsat strukturu o požadovaných parametrech a následně ho pomocí vývojky vyvolat.

V teoretické části bakalářská práce seznamuje s problematikou elektronové litografie, hlavními součástmi elektronového litografu a běžně užívanými polymerními rezisty pro zápis elektronovým svazkem.

Praktická část se zaměřuje na přípravu roztoků polymerů PMMA o různých hmotnostních koncentracích a jeho následném nanesení na křemíkový substrát, expozicí a vyhodnocením citlivostních testů, které byly exponovány elektronovým svazkem na připravené substráty s nanesenou vrstvou polymeru.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE

Elektronová litografie vznikla v šedesátých letech 20. století, kvůli neustálé potřebě miniaturizovat elektronické komponenty využívaných v počítačích a jiné elektronice. V dnešní době se setkáváme s komerčními litografy s urychlovacím napětím okolo 100 kV a laboratorními litografy pro R&D, které mají urychlovací napětí nižší než 50 kV. U laboratorních litografů se používá nižší urychlovací napětí, protože se jedná původně o zařízení konstrukčně založeném na elektronovém mikroskopu (Scanning Electron Microscope – SEM), který byl upraven tak, aby bylo možné zapisovat elektronovým svazkem.

1.1 Elektronový litograf

Jedná se o zařízení umožňující zápis elektronovým svazkem. Elektronový litograf se skládá z několika částí. První část je tak zvaná elektronová tryska, která generuje elektronový svazek. Skládá se z katody, která je schopna vydržet vysoké teploty a dochází u ní k minimálnímu odpařování materiálu. Nejvíce využívaným materiálem pro katody byl wolfram, který je schopen vydržet teploty okolo 2700 K. Postupem času byly objeveny vhodnější alternativy jako je například lanthan hexaborid (LaB_6). [1]

Tabulka 1 Vlastnosti elektronových zdrojů (emitorů) [1]

Typ katody	Jas [$\text{A}/\text{cm}^2/\text{sr}$]	Velikost zdroje	Rozptyl energie [eV]	Potřebné vakuum [Pa]
Žhavená wolframová	$\sim 10^5$	$\sim 25 \mu\text{m}$	2-3	10^{-4}
LaB_6	$\sim 10^6$	$\sim 10 \mu\text{m}$	2-3	10^{-6}
Termální FE	$\sim 10^8$	$\sim 20 \text{nm}$	0,9	10^{-7}
W & studená FE	$\sim 10^9$	5 nm	0,22	10^{-8}

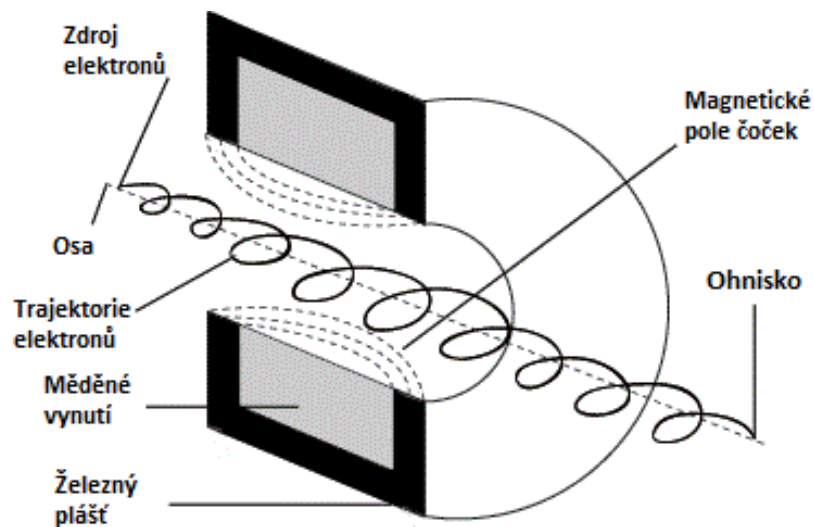
1.1.1 Optické prvky elektronového litografu

Součástí EBL jsou i optické prvky jako jsou apertury, zatemňovací desky, vychylovací systémy, vyrovnávací cívkky a stigmátory. Jejich úkolem je korekce elektronového svazku. [1]

1.1.2 Elektronové čočky

Další částí elektronového litografu jsou elektronové čočky. Tyto čočky jsou schopné soustředit elektrony pomocí magnetického nebo elektrostatického pole. Síla magnetického

pole tlačí elektrony ke středu optické osy a takto můžeme soustřeďovat elektrony do středu svazku. Elektrostatické čočky nejsou příliš používány kvůli velké výchylce. [1] [2]



Obrázek 1 Schéma magnetické čočky [3]

1.1.3 Apertury

Apertury využíváme z několika důvodů jako je například eliminace rozptýlených elektronů, tvarování svazku nebo zatemňování svazku. Apertura je vložena do místa odchylovajícího se svazku a tím zamezí extrémním odchylkám. Apertury je třeba postupem času vyměňovat nebo čistit. Je to z důvodu vytváření kontaminace na povrchu apertury, kdy vzniká usazenina na daném materiálu, ze kterého je apertura vytvořena. Tento problém může být vyřešen výměnou apertury nebo zahřátím pomocí plamene u platinových apertur. [4]

1.1.4 Vychylování elektronové svazku

Vychylováním elektronového svazku skenujeme zkoumaný vzorek. Vychýlení můžeme dosáhnout magneticky nebo elektrostaticky. Využíváme cívek, které jsou kolmo orientovány k optické ose. Vychylováním dochází k dalším odchylkám elektronového svazku, tím k zhoršení jeho průměru a zároveň to vede ke vzniku dalších odkloněným elektronům. To vede k limitnímu omezení maxima pole a velikosti průhybu, které můžeme použít. Výchylka pomocí magnetického pole způsobuje menší problémy ve svazku než elektrostatické pole. Avšak elektrostatické pole dosahuje mnohem větších rychlostí, protože indukce u magnetických cívek omezuje frekvenční odezvu a tím rychlost magnetické výchylky. Tyto systémy jsou většinou uloženy v poslední čočce, která je

odstíněna od vířivého proudu pomocí keramické sloučeniny většinou složené z oxidu železa zvané ferit. [1] [5]

1.1.5 Zatemňování svazku

Zatemňování svazku je za potřeby, pokud chceme zabránit nechtěné expozici vzorku v určitých místech. Zatemňování svazku je prováděno pomocí jedné nebo dvou desek, které jsou napojeny na zatemňovací zesilovač. Pro vypnutí svazku přivádíme elektrické napětí na deflektorové desky. To způsobí, že paprsek je vychýlen z osy, dokud nenarazí na clonu.

U systémů s velkou rychlostí je potřeba několika těchto desek, aby bylo zajištěno zatemnění svazku. [1] [6]

1.1.6 Stigmátory

Nedokonalá konstrukce elektronového tubusu a špatné nastavení svazku vede k astigmatismu což je refrakční vada. Tyto nedokonalosti se opravují pomocí tzv. stigmátorů. Jedná se o součástku, která má schopnost pomocí několika elektrických nebo magnetických polí tento jev potlačit. Nejčastěji se můžeme setkat se soustavou čtyř nebo osmi polí. [1]

1.2 Ostatní prvky elektronového litografu

1.2.1 Faradayova klec

Další důležitá část elektronového litografu je Faradayova klec. Nachází se pod poslední čočkou. Její funkcí je schopnost měřit proud ve svazku. Proud je potřebné měřit pro správný výpočet dávky, která je potřebná pro správnou expozici rezistu. [1]

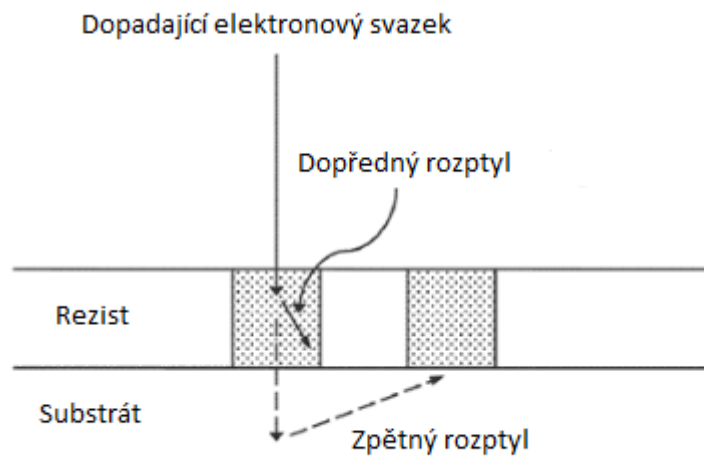
1.2.2 Vakuum

Pro zápis elektronovým svazkem je potřeba zajistit co nejmenší rozptyl elektronů, proto je třeba dosáhnout co největší hodnoty vakua v zařízení, aby nedocházelo k srážkám elektronů s atomy plynu.

1.3 Elektronové interakce s pevnými látky

1.3.1 Rozlišení

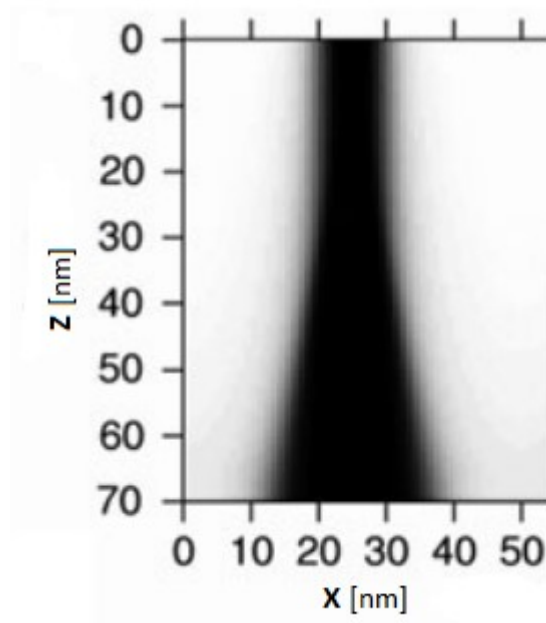
Výsledné rozlišení struktur připravených pomocí EBL je především určeno rozptylem primárních a sekundárních elektronů v materiálu rezistu a substrátu. Interakce elektronů s pevnými látkami jsou závislé na vlastnostech svazku, exponovaném materiálu a tloušťce rezistu. Při kontaktu elektronů se vzorkem dochází k několika interakcím, které mohou výsledné rozlišení vzorku ovlivnit. [7]



Obrázek 2 Interakce elektronového svazku s rezistem a substrátem [8]

1.3.2 Dopředný rozptyl elektronů

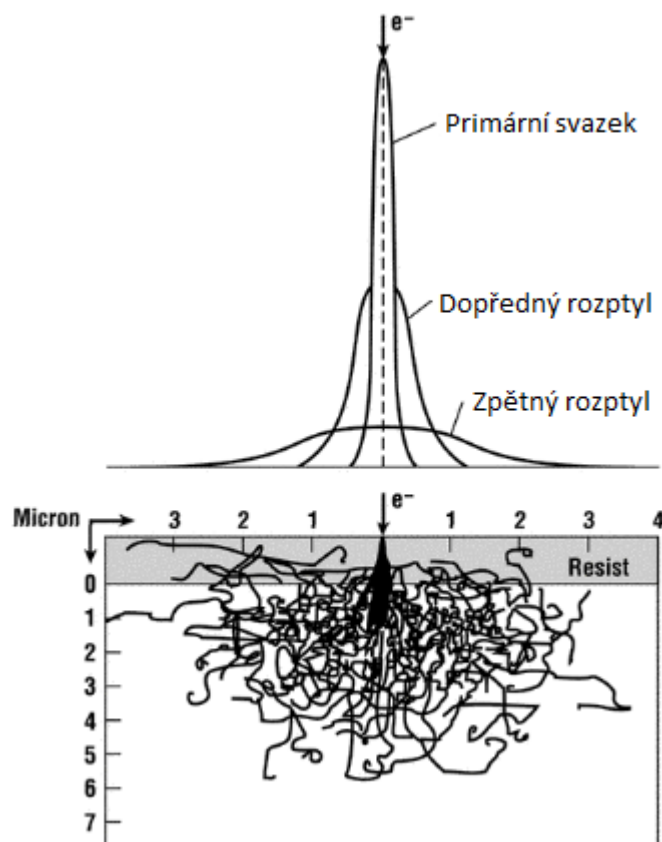
Při průchodu elektronů materiálem rezistu dochází k rozšiřování dopadajícího svazku. Výsledný rozměr exponovaného místa je větší než velikost soustředěného elektronového svazku. Dopředný rozptyl má největší vliv na výsledné rozlišení a jsme ho schopni potlačit zvýšením napětí elektronového svazku. [9] [10] [12]



Obrázek 3 Rozšiřování elektronové svazku z důvodu dopředného rozptylu elektronů při energii 10 keV [11]

1.3.3 Zpětný rozptyl elektronů

Ke zpětnému rozptylu elektronů dochází po průchodu elektronů přes rezist až na substrát, kde může dojít k odrazu až o 180° a vrací se směrem k povrchu vzorku. Může tedy dojít k uložení energie mimo primární svazek a tím dojde ke zkreslení požadovaného vzoru. Tyto elektrony mohou být nadále zachyceny pomocí detektoru, protože mají mnohem větší energii než sekundární elektrony což se využívá v elektronové mikroskopii. Odrazivost elektronů je závislá na protonovém čísle látky. Pro minimalizaci dopadu na rozlišení výsledných struktur, se využíváme tenkých vrstev rezistu. [9] [10] [12]



Obrázek 4 Trajektorie rozptýlených elektronů ve vzorku [12]

1.3.4 Sekundární elektrony

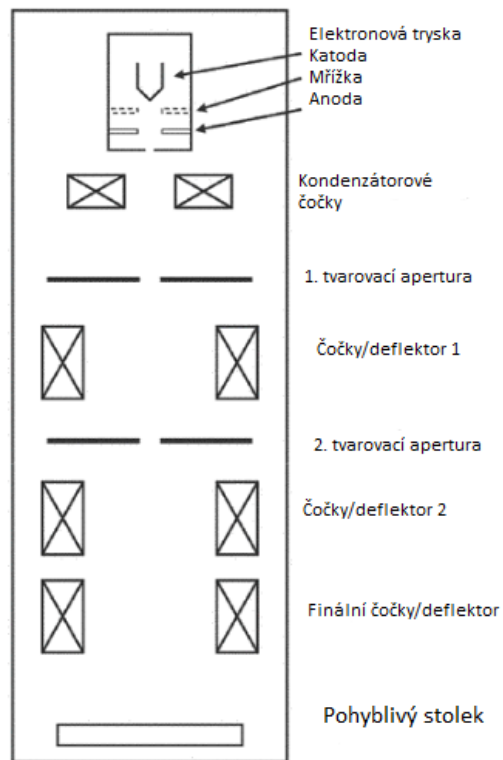
Elektrony uvolněné ze vzorku se nazývají sekundární. Jedná se o elektrony s malou energií (2 – 50 eV). Tyto elektrony jsou zodpovědné za expozici polymerního rezistu. Kvůli své nízké energii nejsou schopny uniknout ze vzorku pokud jsou daleko od povrchu. Uniklé elektrony, kterým se podaří dostat ze vzorku, můžeme zaznamenat pomocí detektoru, proto se dá těchto elektronů využít v elektronové mikroskopii. [13]

1.3.5 Proximity efekt

Interakce elektronů s rezistem a substrátem způsobují tzv. proximity efekt, což znamená, že energie z primárních a zpětně odražených elektronů se ukládá do míst mimo místo expozice. To má za následek, že skutečná velikost struktury je větší než navržená velikost struktury. U malých struktur může dojít k takové ztrátě dávky, že vyvolaná struktura bude nekompletní. [1] [14]

1.4 Typy elektronových litografů

V dnešní době máme k dispozici 3 typy elektronových litografů. Prvními jsou SEM konverze, dále jednoúčelové EBL systémy a poslední velmi drahé EBL litografy.



Obrázek 5 Obecný popis zařízení elektronového litografu [15]



Obrázek 6 Jednoúčelový EBL systém Raith EBP5200 [16]

1.4.1 Litograf na konstrukční základně elektronového mikroskopu (SEM konverze)

V praxi se velmi často můžeme setkat s tzv. SEM konverzí. Jedná se o úpravu rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM), kdy k původnímu mikroskopu je přidáno zatemňování svazku a hardwarový ovladač. Tím získáme schopnost nejen pozorovat vzorek, ale i do něho pomocí svazku zapisovat struktury. Tyto konverze mají malé zorné pole a nízkou rychlost zápisu. Tato modifikace se cenově pohybuje okolo 2,5 až 5 milionů korun. [1]

1.4.2 Jednouúčelový EBL systém

Celý systém je automatizovaný na rozdíl od SEM konverzí. Využívá se pro komerční účely. Urychlovací napětí u těchto zařízení dosahuje až 100 kV. Některé pokročilé systémy jsou schopny zapisovat struktury o velikosti pod 8 nm. Hodnota zařízení se pohybuje okolo 25 až 50 milionů korun. [17]

1.4.3 EBL litograf

Jedná se o velké, automatizované systémy, které jsou schopny zapisovat struktury o velmi malých rozměrech i několik dní v kuse. Většina těchto systémů operuje s urychlovacím napětím 100 kV a více. Výsledné struktury jsou snadno reprodukovatelné a velmi přesné. Cena těchto zařízení se pohybuje přes 100 milionů korun.

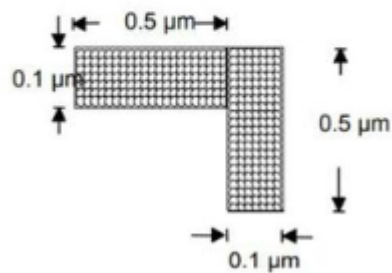
1.5 Typy elektronových svazků

V rastrovacích skenovacích zařízeních se používají dva typy svazků. Prvním typem je Gaussovský tvar svazku, který má rozložení energie ve svazku definováno Gaussovou funkcí. Druhým typem je svazek tvarovaný, který se může v průběhu zápisu měnit. Tvarovaný svazek má ve většině případů pravoúhlý tvar svazku. [18]

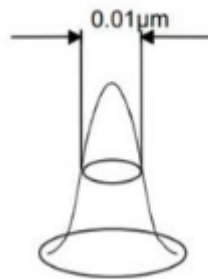
1.5.1 Gaussovský svazek (Gaussian Round Beam)

Bodový paprsek Gaussovského svazku může mít minimální velikost pod 5 nm. Jeho tvar má kruhovou symetrii v zápisové rovině. Intenzita svazku je přibližně Gaussově distribuci energie. Při tvorbě rohů u pravoúhlých struktur v maskách je potřeba, aby byl průměr svazku mnohem menší než požadovaný parametr struktury. Pomocí elektronových optických součástek můžeme měnit průměr a proud svazku. Tento svazek využíváme hlavně pokud potřebujeme získat co největší rozlišení struktury. [18] [19]

Gaussovský svazek



Gaussovský svazek
(bod za bodem $10 \times 50 \times 2 = 1000$ bodů)

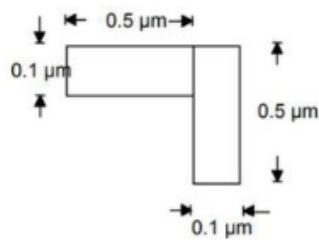


Obrázek 7 Vzhled Gaussovského svazku [20]

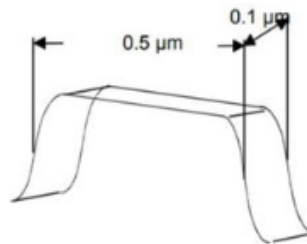
1.5.2 Tvarovaný svazek (Variable Shaped Beam)

Tvarované svazky mají pravoúhlý tvar svazku. Právě díky pravoúhlé podobě svazku je mnohem jednodušší zapisovat rohy ve struktuře i s velkými svazky. Ve srovnání s Gaussovským svazkem lze tvarovanými svazky dosáhnout vyšší rychlosti zápisu. Tvarovaného svazku se nejvíce využívá při vytváření masek, kde lze obětovat rozlišení z komerčních důvodů. [18]

Tvarovaný svazek



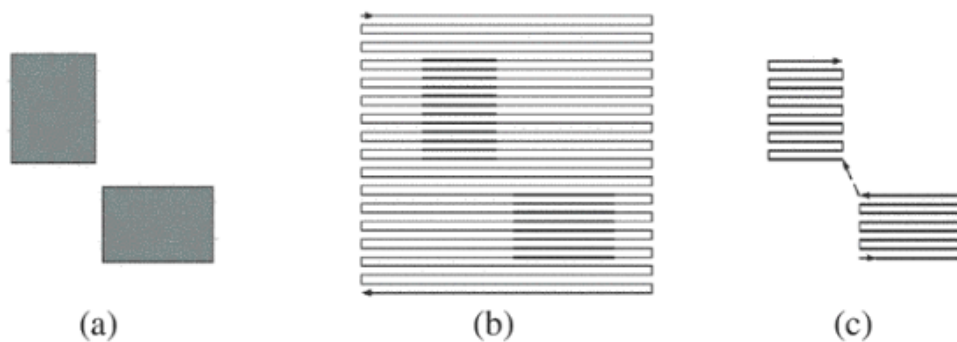
Tvarovaný svazek (2 tvary)



Obrázek 8 Vzhled tvarovaného svazku [20]

1.5.3 Rastrový a vektorový zápis struktury

Pokud zapisujeme strukturu pomocí elektronového svazku můžeme tak učinit dvěma způsoby. Prvním je rastrový zápis, kdy skenovací systém přebíhá po celé ploše, kde dochází k zatemňování a odtemňování elektronového svazku na požadovaných místech. Druhý způsob zápisu je vektorový, kdy dochází ke skenování pouze požadovaných míst, které mají být exponovány. Vektorového zápisu můžeme využít u Gaussovského svazku a tvarovaného svazku, ale rastrový zápis je limitován pouze na Gaussovský svazek. [18]



Obrázek 9 (a) požadovaná plocha expozice, (b) rastrový zápis struktury, (c) vektorový zápis struktury [8]

2 PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU S POLYMERNÍ VRSTVOU PRO ZÁPIS

Polymerní rezisty jsou materiály využívané při přípravě mikro a nanostruktur v elektronice. Jedná se o materiály, u kterých dojde po expozici elektronovým svazkem k porušení polymerních vazeb (pozitivní) nebo naopak dojde k posílení polymerních vazeb (negativní). Tyto exponované materiály lze následně vyvolat pomocí vývojek, kdy dojde k odstranění nežádoucí vrstvy rezistu. Následně mohou být tyto struktury využity například pro přípravu elektronických součástek.

2.1 Substrát

Nejčastěji se u EBL setkáváme s křemíkovým substrátem, který tvoří základ pro vytváření součástek jako jsou tranzistory, senzory a další elektronické součástky malých velikostí. Křemík je polovodičem, který má 4 valenční elektrony. Pokud do křemíku přidáme cizí atom například india, tak získáme polovodič typu P a nebo po přidání arzenu získáme polovodič typu N. Kombinací těchto polovodičů můžeme vytvořit například tranzistory, diody, fotovoltaické články a další komponenty.

2.1.1 Monokrystalický křemík

U polovodičových součástek velmi záleží na čistotě křemíku a jeho krystalografické struktuře. Čistoty u křemíku můžeme dosáhnout pomocí tzv. zonálního tavení nebo redukcí oxidu křemičitého s uhlíkem a následně Siemensově reakci. Zonální tavení je metoda, kdy je materiál lokálně na jedné straně nataven a pomocí pohyblivého ohřívače je tato natavená část přesouvána na konec materiálu. Proces se opakuje dokud nedosáhneme požadované čistoty křemíku.

Pokud chceme získat monokrystalický křemík, tak nejčastěji využíváme tzv. Czochralského metodu. Granulovaný křemík, který byl získán zonálním tavením nebo Siemensovou reakcí, je roztaven v peci s dopující látkou jako může být například bor, indium nebo arzen. Poté je do taveniny vložen zárodečný monokrystal křemíku se správnou orientací a rostoucí krystal je postupně táhnut směrem vzhůru z taveniny. Teplota je přísně regulována, aby nedošlo ke krystalografickým chybám a tím získáme výsledný monokrystal křemíku. Následně je křemík rozřezán na tenké plátky tzv. wafery. [21]

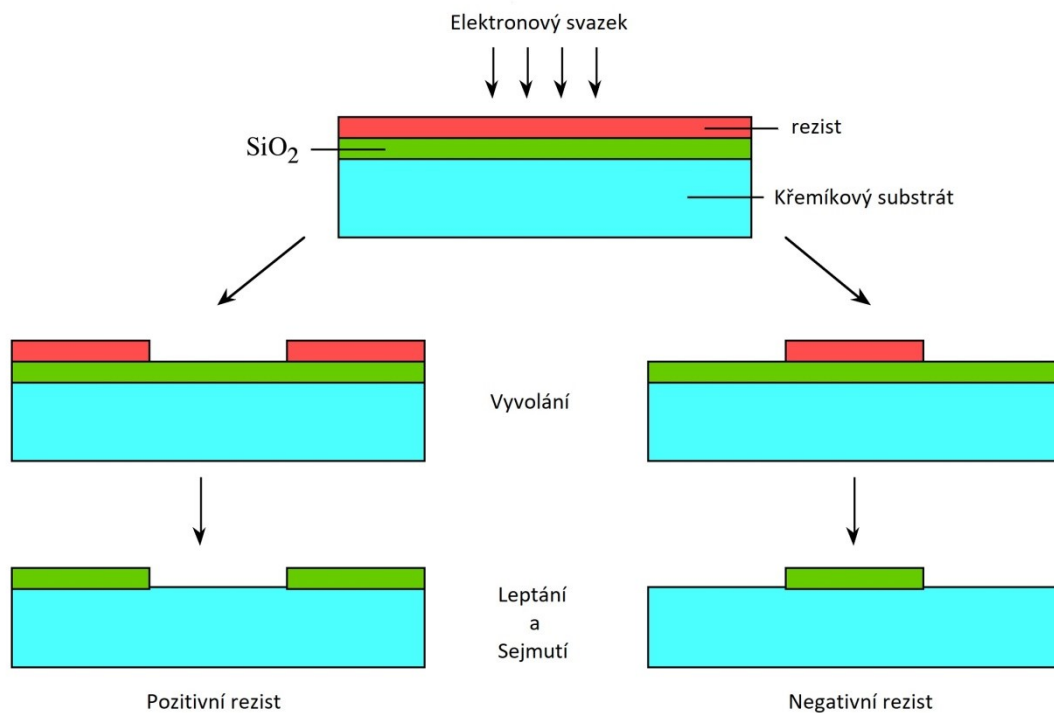
2.2 Polymerní rezist

Neexponované pozitivní rezisty jsou zpravidla velmi málo rozpustné ve vývojkách. Proto je důležité dodat do polymerní vrstvy energii, které způsobí oslabení polymerních vazeb v exponovaném místě.

Polymerní rezisty jsou rozpuštěny v příslušném rozpouštědle, které je kapalné. Roztok je nanášen na substrát pomocí odstředivé síly. Vrstva roztoku je nanášena s rovnoměrnou tloušťkou na substrát. Poté je rozpouštědlo odpařeno a vzniká nám polymerní vrstva rezistu na substrátu.

Při vystavení polymerní vrstvy elektronům může dojít buď k oslabení polymerních vazeb u pozitivních rezistů nebo k zesílení polymerních vazeb u negativních rezistů.

K odstranění rezistu používáme tzv. vývojku. Jedná se o rozpouštědlo, které má schopnost odstranit nejslabší vrstvy polymeru. Pro dosažení největší efektivity vývojky je potřeba zjistit efektivní dobu vyvolání a vybrat patřičnou vývojku. Při dlouhodobé expozici vzorku vývojce může dojít k nežádoucímu rozpuštění neexponovaných vazeb u pozitivního rezistu a naopak u negativního dojde k rozpuštění naexponovaného rezistu. [22]



Obrázek 10 Srovnání pozitivního a negativního rezistu [23]

2.2.1 Rozptyl náboje

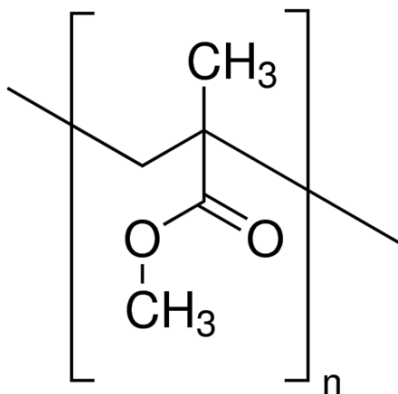
Velmi častým problémem vyskytujícím se při expozici vzorku je u substrátů nevodivost, kdy u nevodičů dochází k nabíjení substrátu. Ta způsobuje značné chyby při zapisování vícevrstevných struktur u polovodičů. Nejčastěji se tento problém řeší depozicí vrstvy kovu na rezist. Vrstva má tloušťku zhruba 10 nm a je vytvořena z kovů jako je zlato, hliník, chrom nebo slitiny zlata a paladia. Díky této vrstvě kovu dochází k minimálnímu rozptylu elektronů a zachování cílené expozice. Vrstva je následně odstraněna rozpouštědly daných kovů. [1]

2.3 Pozitivní rezisty

Pozitivní rezisty jsou takové látky, u kterých po expozici elektronovým svazkem dojde k narušení polymerních vazeb a tudíž se zvýší rozpustnost ve vybrané vývojce. U většiny pozitivních rezistů nedochází k botnání na rozdíl od negativních rezistů. [22]

2.3.1 PMMA

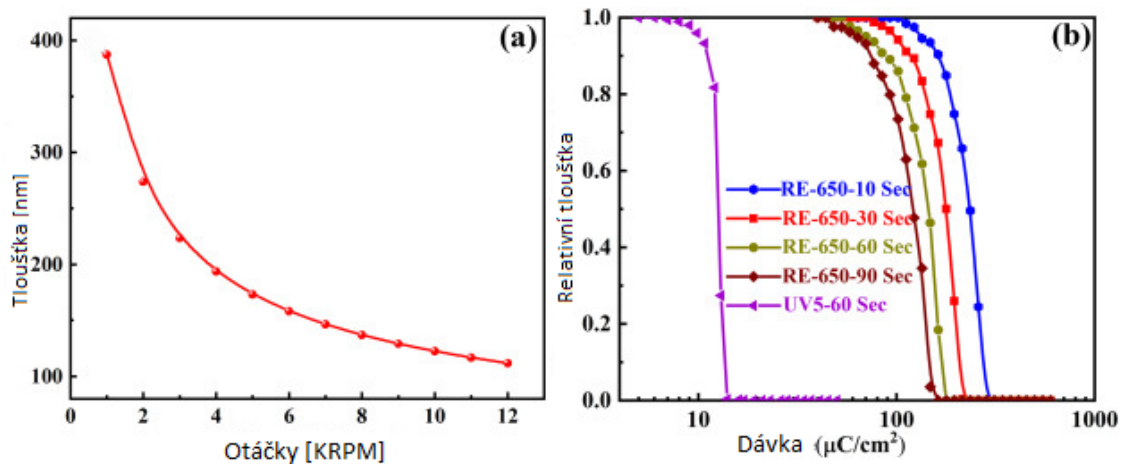
Jeden z prvních rezistů využívaných pro EBL byl polymethylmetakrylát (PMMA). PMMA je pozitivní rezist, který dosahuje velmi dobrých rozlišení. Nejčastěji je rozpouštěn v anisolu nebo chlorbenzenu a pomocí spincoateru nanášen na substrát. Zbylé rozpouštědlo je odpařeno při teplotách 170 – 200 °C po dobu 1 – 2 hodin. Expozicí u PMMA dojde k rozbití polymerních vazeb a pomocí vývojek jako jsou methylisobutylketon (MIBK) nebo isopropylalkohol (IPA, 2-propanol), které přednostně tyto vazby rozpouští. Při expozici PMMA dávkou několikrát vyšší než je optimální, dojde k síťování a PMMA se stane rezistem negativním. [1]



Obrázek 11 Strukturní vzorec PMMA [24]

2.3.2 RE-650

Tento rezist projevuje vysokou citlivost a odolnost při suchém leptání. Jedná se o pozitivní kopolymerní rezist složený z methylester kyseliny 2-chlorakrylové a alfa-methylstyrenu. Rozlišením a kontrastem je velmi podobný rezistu PMMA, ale jeho hlavní výhodou je rezistivita vůči plazmě. [25]



Obrázek 12 (a) Závislost tloušťky rezistu na otáčkách, (b) závislost relativní tloušťky na expoziční dávce, vývojka o-xylen [25]

2.4 Negativní rezisty

Negativní rezisty jsou polymery, které mají schopnost síťovat po expozici elektronovým svazkem. Dojde k síťování polymerních vazeb a neexponovaná místa jsou následně odstraněna pomocí vývojek.

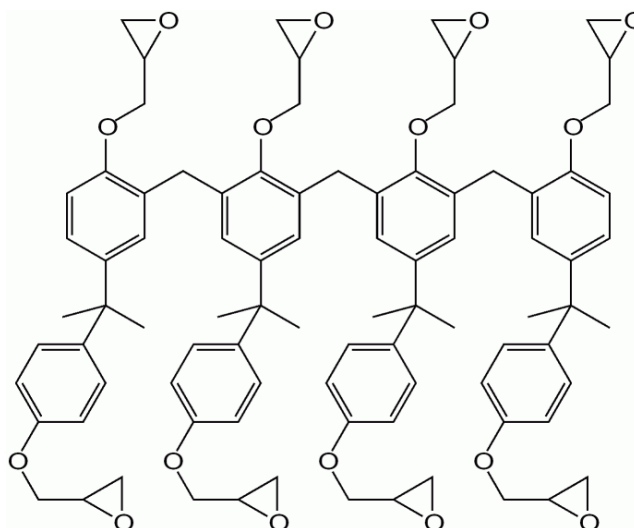
2.4.1 COP

COP je epoxidový kopolymer ethylakrylátu a glycidyl metakrylátu (GMA-co-EA). Využívá se jako negativní rezist u EBL. Jeho rozlišení je velmi nízké okolo 1 μm . U COP dochází k několika problémům, jako je třeba botnění polymeru nebo síťování polymeru řetězovou reakcí po expozici. Vlastnosti struktury tedy ovlivňuje čas mezi expozicí a vyvoláním i způsob vyvolání. [1]

2.4.2 SU-8

SU-8 je negativní fotorezist. Skládá se z bisfenolu A a organického rozpouštědla, jako je gamma-butyrolaktonu nebo cyklopentanon a fotoinciátoru. Jako expoziční zdroj se využívá

záření blízké UV. Nejčastějším zdrojem je rtuťová lampa. Díky své nízké optické absorpci je SU-8 vhodný k vytváření tlustých filmů rezistu až do 2 mm. Komerčně je SU-8 dostupný v různých hodnotách viskozity. Tento rezist je velmi rozšířený při vytváření tzv. mikrokanálek. Jedná se o kanálkové struktury, které jsou následně od sebe odděleny křemíkovým waferem nebo skelnou deskou. [26]



Obrázek 13 Strukturální vzorec negativního fotorezistu SU-8 [27]

2.5 Citlivost rezistu

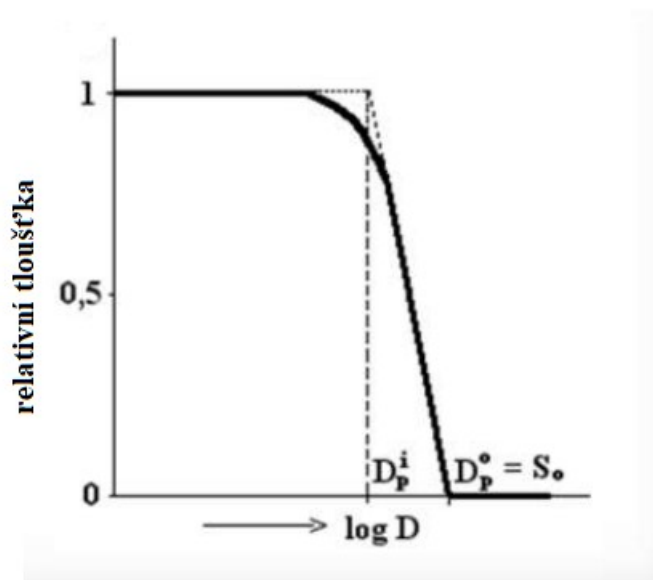
Citlivost rezistu je popsána dávkou ozáření elektrony, kdy dochází k rozpuštění celé tloušťky při dané vývojce. Pokud chceme zjistit citlivost připraveného rezistu, tak můžeme využít tzv. citlivostního testu. Citlivostní test spočívá ve vytvoření určité opakující se struktury, kdy každá identická struktura je vystavěna určité expoziční dávce. Po vyvolání citlivostního testu zjistíme, která dávka je dostatečná k vyvolání rezistu až na povrch substrátu pro danou vývojku. [28]

2.6 Kontrast rezistu

Kontrast rezistu je definován jako obrácená hodnota absolutní hodnoty dekadického logaritmu poměru dávky D_p^i a D_p^o . Dávka D_p^i je nejvyšší hodnota, při které nedošlo k úbytku rezistu po vyvolání. D_p^o je první hodnota, při které dojde k úplnému odstranění polymerní vrstvy po vyvolání až na substrát. Definovaný vztah kontrastu :

$$\gamma = |\log_{10}(D_p^i/D_p^o)|^{-1}.$$

Tyto hodnoty nám plynou z grafu závislosti úbytku relativní tloušťky vrstvy na logaritmu expoziční dávky. K získání těchto hodnot využíváme tzv. citlivostní test, kdy exponujeme vrstvu polymerního rezistu různými dávkami energie a po vyvolání určitou vývojkou změříme úbytek vrstvy u všech dávek. [1] [28]



Obrázek 14 Obecná kontrastní křivka rezistu [28]

2.7 Zpracování rezistu

2.7.1 Depozice polymeru na substrát

Polymer se nanáší ve formě roztoku na substrát pomocí odstředivých sil. Nejčastější metodou je tzv. spin – coating. Substrát je vložen do spincoateru a pomocí vakua přichycen k držáku. Zároveň se využívá plynu jako je třeba dusík pro nereaktivní prostředí. Dále se nastavují parametry, jako je čas odstředění a RPM (revolutions per minute). Roztok polymeru se nakape na substrát a rotací dojde k rovnoměrné depozici polymeru na substrát. S rostoucí hodnotou RPM se tloušťka rezistu snižuje a limitně se blíží určitému minimu, které závisí na hmotnostním zlomku roztoku polymeru.

2.7.2 Softbake

Po depozici roztoku polymeru na substrát zůstává ve vrstvě určité množství rozpouštědla – rezidua. K odstranění tohoto zbytku využíváme procesu softbake neboli prebake. Substrát s polymerem ještě před expozicí je vložen do vytemperované pece, kde dochází k odpaření

zbytkového rozpouštědla a dochází tak k zhoustnutí rezistu. Přestože vliv rozpouštědla je zanedbatelný, ovlivňuje nám teplotu skelného přechodu a umožňuje tak deformaci vzorku. Rozpouštědlo má vliv i na expozici vzorku, kdy je obtížné předvídat potřebnou expoziční dávku energie. [29]

2.7.3 Zápis struktury

Zápis do polymerního rezistu provádíme různými způsoby. Jedním z možných zápisů struktur je elektronová litografie, která je popsána v sekci 1. Dalšími způsoby zápisu jsou například fotolitografie nebo rentgenová litografie. Metody jsou si principiálně podobné, ale každá metoda vyžaduje jinou aparaturu a přístup.

2.7.4 Vyvolání rezistu

Vyvolání rezistu se provádí pomocí vývojek. Jedná se o chemická kapalná rozpouštědla, která jsou schopna rozpustit slabé polymerní vazby rezistu. Pro každý rezist existuje několik vývojek a jejich směsí v určitém poměru. U PMMA se nejvíce využívá isopropylalkoholu, methylisobutylketonu a jejich směsí s vodou :

Tabulka 2 Hodnoty citlivosti a kontrastu u PMMA pro různé typy vývojek [30]

Vývojka	Citlivost [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	Kontrast γ
MIBK/IPA	520	5,4
Voda/IPA	380	6,4
Voda/MIBK	200	3,1

2.7.5 Hardbake

Hardbake je proces vytvrzení rezistu před dalším zpracováním. Provádí se po vyvolání rezistu, aby došlo k odstranění zbytku vývojk a vzdušné vlhkosti z rezistu a tím ke zlepšení odolnosti materiálu rezistu při dalších technologických krocích (plazmatické, iontové leptání). Teplota vypékání by neměla přeskočit teplotu skelného přechodu T_g daného rezistu. [31]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU S POLYMERNÍ VRSTVOU PRO ZÁPIS

3.1 Použité látky, přístroje a pomůcky

Chemikálie a rozpouštědla :

- Anisol (Sigma-Aldrich, $M = 108,14 \text{ g/mol}$)
- PMMA (Sigma-Aldrich, $M_w = \sim 350000 \text{ g/mol}$)
- 2-propanol ($M = 60,10 \text{ g/mol}$; $\rho = 0,786 \text{ g/cm}^3$)
- n-amylacetát (Sigma-Aldrich, $M = 130,18 \text{ g/mol}$; $\rho = 0,87 \text{ g/cm}^3$)
- Methylisobutylketon (Sigma-Aldrich, $M = 100,16 \text{ g/mol}$)

Substráty :

- Křemíkový wafer (100 nedopovaný)

Přístroje :

- Magnetické míchadlo Heidolph
- Spincoater Laurell
- Optický mikroskop Leica DVM 2500
- Profilometr Bruker DektakXT
- Mikroskop Tescan VEGA LMU
- AFM Bruker Dimension Icon
- Ultrazvuková lázeň Transsonic
- Sušicí pec Memmert

Pomůcky :

- Pinzety, nůžky, kádinky, nitrilové rukavice, Petriho misky, parafilmová páska, analytické váhy, pipety, diamantové pero, injekční stříkačky, filtry, Kimtech ubrousky

3.2 Příprava substrátu

Pro nanesení vrstev polymerního rezistu byly připraveny substráty z křemíkového waferu. Wafer byl pomocí diamantového nože nařezán na čtverce o velikosti strany přibližně 2 cm. Následně byl mechanicky a chemicky očištěn. Ošetřené vzorky byly uloženy do Petriho misek, aby byly chráněny před prachem, a bylo s nimi manipulováno pouze pomocí pinzety a nitrilových rukavicí.

3.3 Ošetření polovodičového substrátu

Křemíkové substráty byly zbaveny mastnoty pomocí saponátu a vody. Dále byly vloženy do ultrazvukové čističky v kádince s 2-propanolem. Čištění probíhalo po dobu pěti minut. V případě nedostatečné čistoty vzorku se postup opakoval. Hrubé částice prachu byly odstraněny pomocí stlačeného filtrovaného vzduchu a Kimtech ubrousku. Ošetřené vzorky byly ponechány samovolnému vysušení.

3.4 Příprava polymerního roztoku a nanášení polymerní vrstvy

Byly připraveny tři 10 ml roztoky polymeru PMMA o molárních zlomcích 3 hm.%, 6 hm.% a 9 hm.% v anisolu. Zvážený práškový PMMA byl smíchán s anisolem ve skleněných lahvičkách. Za pomoci magnetického míchadla a zvýšené teploty (50 °C) došlo během 24 hodin k rozpuštění PMMA. Vytvořený roztok byl izolován parafilmovou páskou kolem zátky a skladován v ledničce, aby nedocházelo k nechtěnému odpaření rozpouštědla.

3.5 Nanášení polymerní vrstvy na substrát

Vytvořené vzorky křemíku byly umístěny do spincoateru. Pomocí vakua byly uchyceny na nástavci spincoateru. V menu byly nastaveny hodnoty akcelerace, otáček (RPM) a času odstředění. Hodnoty akcelerace, času byly konstantní a to:

Tabulka 3 Konstantní hodnoty pro metodu spincoating

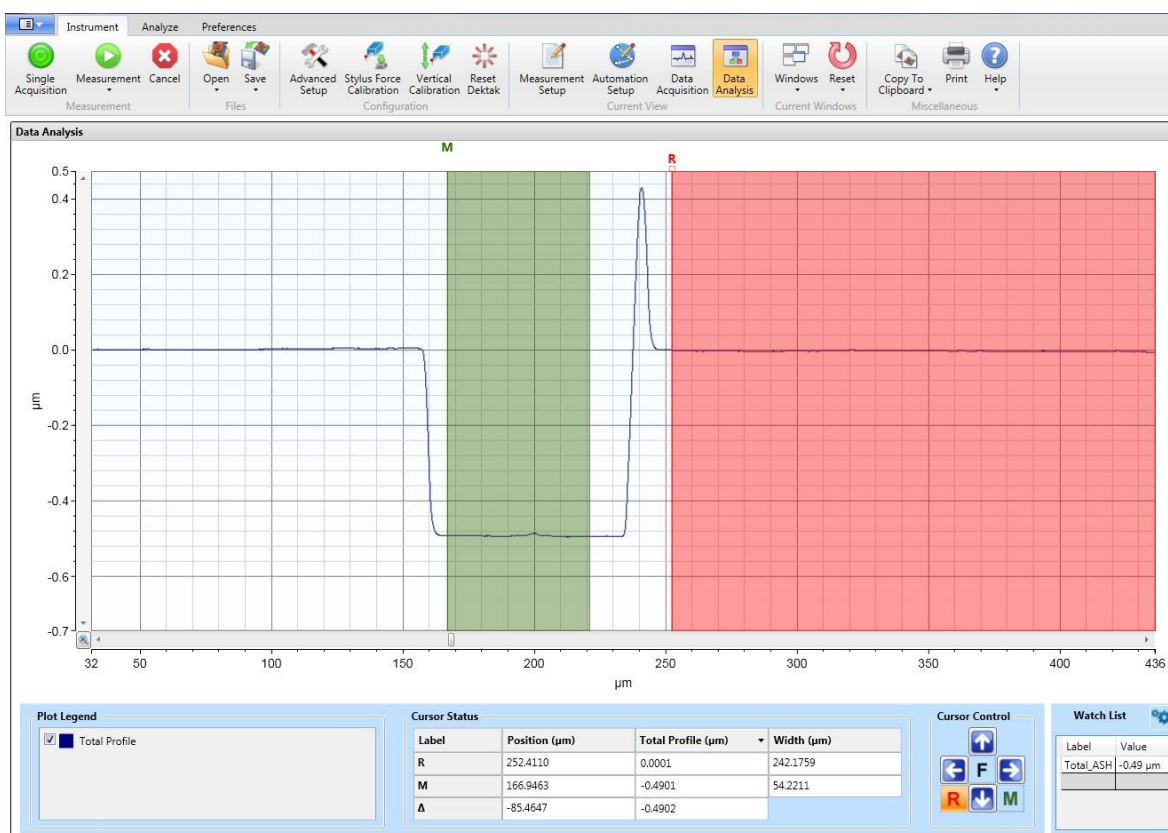
Akcelerace [RPM/s]	1000
T (čas odstředění) [s]	45

Roztok polymeru se nanášel při pokojové teplotě pomocí injekční stříkačky s filtrem. Rotací vzorku s polymerem ve spincoateru došlo k rovnoměrnému nanesení polymerní

vrstvy. Po nanesení polymerní vrstvy byly vzorky vloženy do sušící pece po dobu 30 minut při 180 °C. V tomto čase došlo k odpaření zbylého rozpouštědla anisolu v polymerní vrstvě.

3.6 Měření tloušťky polymerní vrstvy mechanickým profilometrem

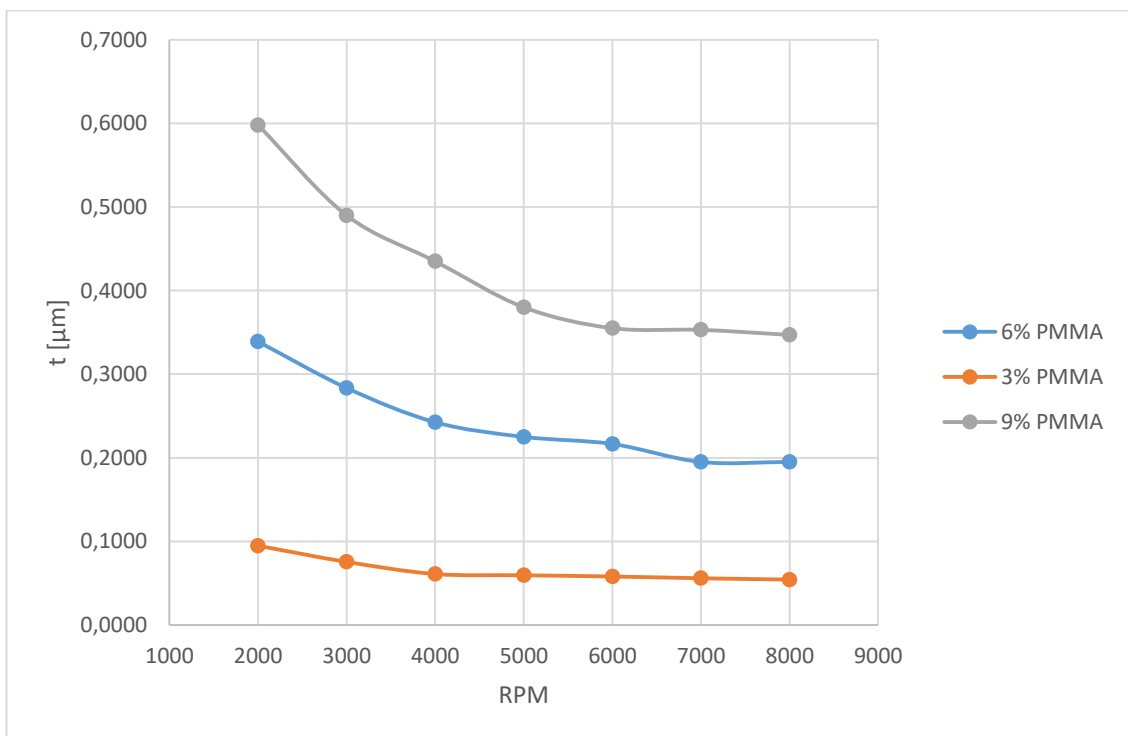
Po vysušení polymerní vrstvy byl vytvořen vryp pinzetou do polymerní vrstvy až na povrch substrátu a pomocí mechanického profilometru Bruker DektakXT byla změřena tloušťka rezistu z rozdílu výšek.



Obrázek 15 Měření na mechanickém profilometru Bruker DektakXT (zelené pole – vryp pinzetou až na substrát, červené pole – tloušťka vzorku Si+PMMA)

Tabulka 4 Naměřená tloušťka rezistu z 3hm.%; 6hm.% a 9hm.% roztoku PMMA při určitých otáčkách (RPM)

RPM	3hm.% PMMA anisol	6hm.% PMMA anisol	9hm.% PMMA anisol
	t [μm]	t [μm]	t [μm]
2000	0,095	0,339	0,598
3000	0,076	0,284	0,490
4000	0,061	0,243	0,435
5000	0,060	0,225	0,380
6000	0,058	0,217	0,355
7000	0,056	0,195	0,353
8000	0,054	0,195	0,347



Obrázek 16 Závislost tloušťky PMMA v anisolu na RPM pro 3hm.%; 6hm.%; 9hm.%

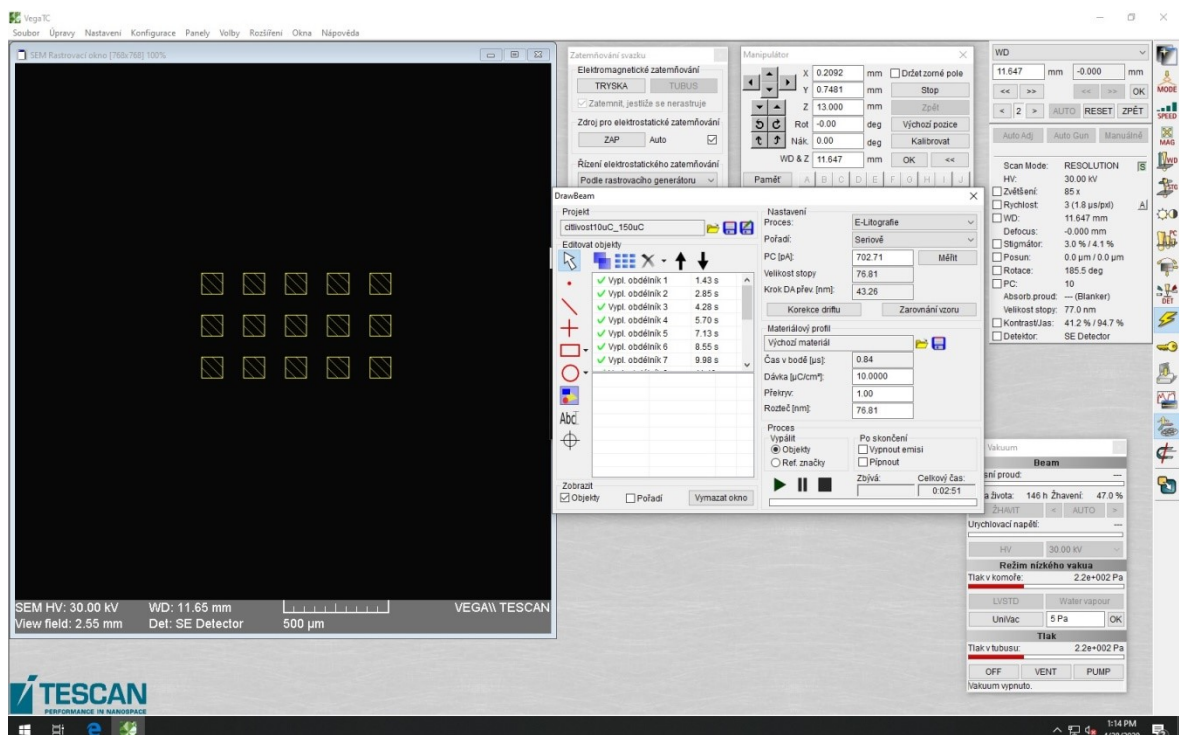
- Z obrázku č. 16 je viditelné, že při zvyšujících se otáčkách se tloušťka materiálu blíží limitně k určité hodnotě pro daný roztok.

4 ZÁPIS STRUKTURY ELEKTRONOVÝM SVAZKEM A NÁSLEDNÉ VYVOLÁNÍ POMOCÍ VÝVOJKY

Aby bylo možné zapsat libovolnou strukturu do daného rezistu, je třeba vystavit fotosensitivní plochu energetickému svazku. V tomto případě svazku elektronů, které působí na pozitivní polymer PMMA. Expozicí dojde k oslabení polymerních vazeb v určitých místech, které mají být následně odstraněny. K odstranění této části nám pomohou chemické roztoky vývojek.

4.1 Zápis elektronovým svazkem

Vzorky byly vloženy do elektronového mikroskopu a upevněny na stojan pomocí lepící pásky. Následně byla uzavřena komora a došlo k odčerpání vzduchu na požadovanou hodnotu vakua pro zápis elektronovým svazkem. Dále byly nastaveny hodnoty zápisu a došlo k vycentrování vzorku na střed optické osy. Zápis struktur byl proveden v elektronovém mikroskopu Tescan VEGA LMU vybaveném beam blankerem v programu VegaTC.



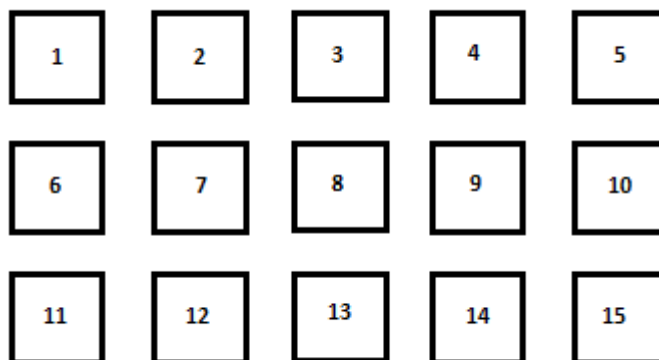
Obrázek 17 Nastavení hodnot citlivostního testu v programu VegaTC

4.2 Vyvolání rezistu

K vyvolání struktury rezistu byly vyzkoušeny vývojky n-amylacetát a MIBK:IPA v poměru 1:3. Vyvolání bylo provedeno na spincoateru, kdy byl exponovaný vzorek uchycen pomocí vakua na spincoater a injekční stříkačkou nanášena vývojka. Po určitém čase vyvolání byla vývojka pomocí odstředivých sil na spincoateru odstraněna.

4.3 Citlivostní testy pro 6hm.% PMMA 3000RPM

Pro určení dostatečné dávky energie byla vytvořena série citlivostních testů, které slouží k odhadnutí potřebné dávky svazku pro konkrétní tloušťku rezistu. Citlivostní test se skládal z 15 čtvercových útvarů o velikosti hrany 100 μm . Číslo (1 až 15) u obrázku č. 18 udává, kolikrát došlo k přeběhu elektronových svazkem o dané energii. Pro vrstvu rezistu nanášené z roztoku 6hm.% PMMA 3000RPM byly nastaveny dávky 10 – 150 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$.



Obrázek 18 Schéma citlivostního testu s počtem přeběhů

Tabulka 5 Expoziční hodnoty citlivostních testů 6hm.% PMMA 3000RPM určených pro vývojky n-amylacetát a MIBK:IPA 1:3 120s

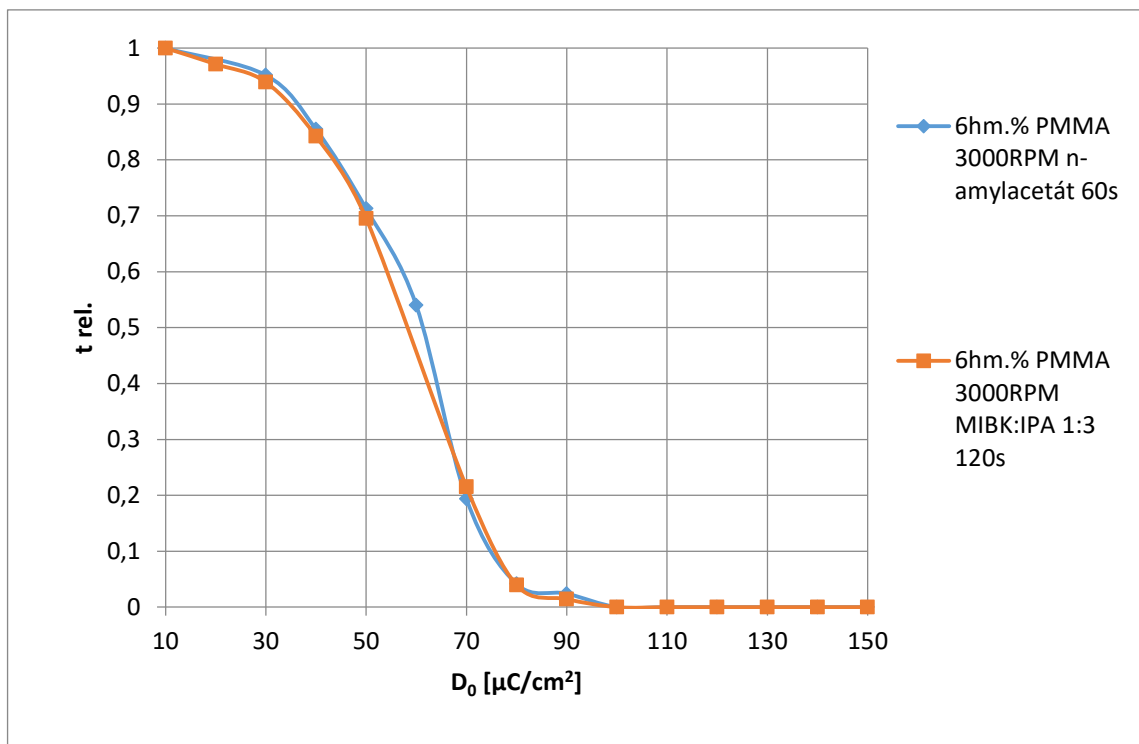
	n-amylacetát 60s	MIBK:IPA 1:3 120s
PC [pA]	798	303,59
Velikost stopy [nm]	89,42	55,85
Dávka [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	10	10
Překryv	1	1
Rozteč [nm]	89,42	55,85
Z [mm]	4	4

Tabulka 6 Naměřené úbytky tlouštěk u 6hmot.% PMMA 3000RPM pro vývojku n-
amylacetát 60s a MIBK:IPA 1:3 120s

D ₀ [μC/cm ²]	log D ₀	n-amylacetát 60s		MIBK:IPA 1:3 120s	
		úbytek t [nm]	t rel.	úbytek t [nm]	t rel.
10	1	0	1	0	1
20	1,30103	defekt	defekt	8	0,971326
30	1,477121	14	0,951557	17	0,939068
40	1,60206	42	0,854671	44	0,842294
50	1,69897	83	0,712803	85	0,695341
60	1,778151	133	0,539792	105	0,623656
70	1,845098	233	0,193772	219	0,215054
80	1,90309	277	0,041522	268	0,039427
90	1,954243	282	0,024221	275	0,014337
100	2	289	0*	279	0*
110	2,041393	280	0*	270	0*
120	2,079181	280	0*	260	0*
130	2,113943	277	0*	265	0*
140	2,146128	283	0*	271	0*
150	2,176091	286	0*	273	0*

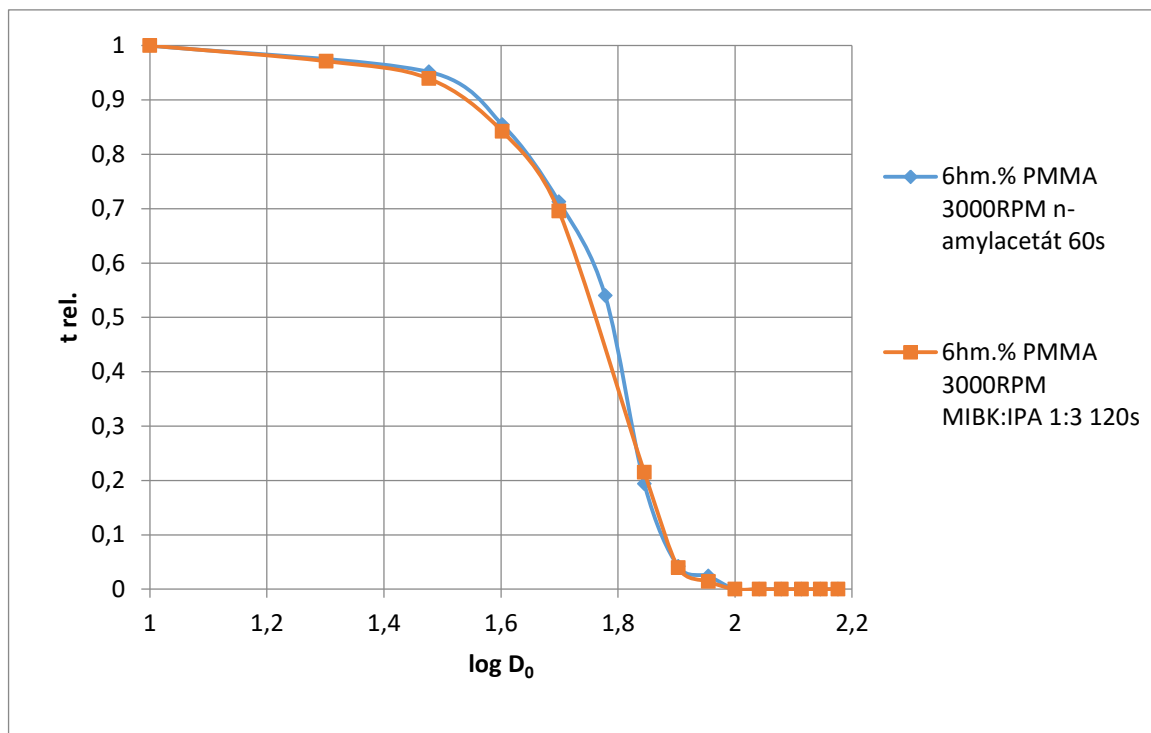
(*100% úbytek vrstvy viditelný optickým mikroskopem a změřen mechanickým profilometrem)

- U vývojky MIBK:IPA 1:3 byla v grafu vynechána hodnota úbytku 105 nm, kvůli chybě měření.



Obrázek 19 Citlivostní křivka pro 6hmot.% PMMA 3000RPM pro vývojku n-amylacetát 60s a MIBK:IPA 1:3 120s

- Citlivost rezistu 6hmot.% PMMA 3000RPM pro vývojku n-amylacetát 60s a vývojku MIBK:IPA 1:3 120s je $80 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.
- Vývojka n-amylacetát není příliš vhodná tloušťku vrstvy, která byla nanášena z roztoku 6hmot.% PMMA 3000RPM. Dochází k příliš rychlému rozpuštění polymerní vrstvy při krátkých časech vyvolání a i při malých nepřesnostech v měření času vyvolání, může dojít k zásadním odchylkám dosažených tloušťek.
- Z tohoto důvodu byla odzkoušena vývojka MIBK:IPA 1:3, která má zachovat vysoké rozlišení struktur, ale časy vyvolání by měly být pro rezist PMMA delší a tudíž bude lepší i říditelnost procesu vyvolání. Z obrázku č. 19 je patrné, že pro stejný úbytek rezistu je čas vyvolání ve vývojce MIBK:IPA 1:3 dvojnásobný.



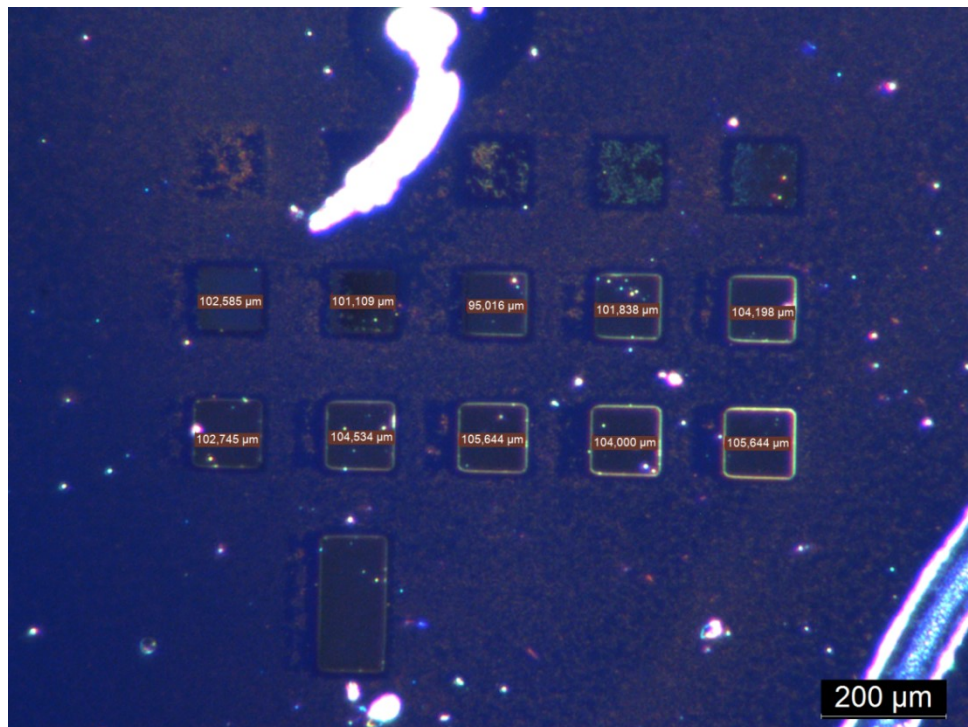
Obrázek 20 Kontrastní křivka pro pro 6hmot.% PMMA 3000RPM pro vývojku n-amylacetát 60s a MIBK:IPA 1:3 120s

4.4 Kontrast u 6hm.% PMMA 3000RPM pro vývojky n-amylacetát a MIBK:IPA 1:3

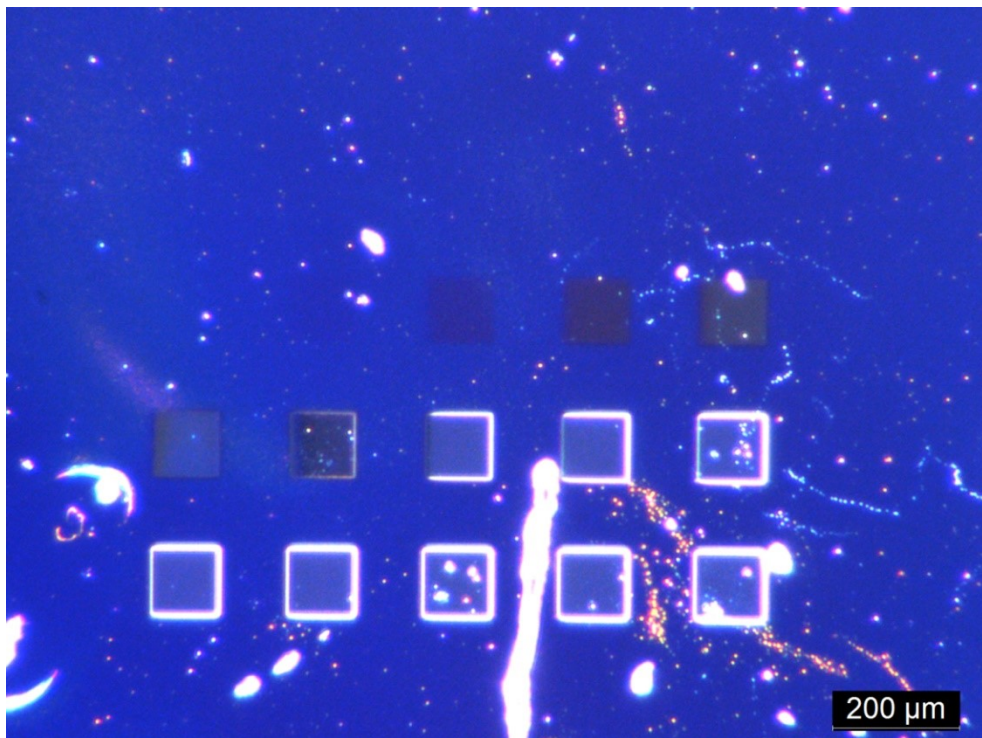
V kapitole 2.6 je podrobně popsána problematika kontrastu polymerních rezistů. Kontrast byl spočítán z absolutní hodnoty směrnice přímky u 6hm.% PMMA 3000RPM a dvě vývojky :

1. Kontrast (N-amylacetát 60s) : $\gamma = 3,5$
2. Kontrast (MIBK:IPA 1:3 120s) : $\gamma = 3,5$

- Z citlivostních a kontrastních křivek můžeme vidět, že parametry nastaveny při zápisu elektronovým svazkem ovlivňují výsledky měření nepatrně.



Obrázek 21 Citlivostní test pro 6hmot.% PMMA 3000RPM a vývojkou n-amylicetát 60s



Obrázek 22 Citlivostní test pro 6hmot.% PMMA 3000RPM a vývojkou IPA:MIBK 3:1

120s

- Vývojka MIBK:IPA 1:3 dosahuje lepšího rozlišení než n-amylicetát a nedochází tolik k vyvolání neexponovaných vrstev rezistu.

4.5 Citlivostní testy pro 9hmot.% PMMA 6000RPM

Kvůli krátkým časům vyvolání byla zvolena tlustší vrstva rezistu a to 9hmot.% PMMA 6000RPM. Na 9hmot.% vrstvě PMMA 6000RPM byly vytvořeny 3 citlivostní testy – A, B, C, které měly nastaveny různé expoziční hodnoty při zápisu elektronovým svazkem. Rozmezí dávek u citlivostních testů bylo sníženo ze 10 – 150 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ na 5 – 75 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$.

Vyvolání rezistu bylo provedeno v několika krocích, kdy došlo k vyvolání při určitém čase a následném změření úbytku tloušťky na mechanickém profilometru. Výsledně bylo vyvolání n-amylacetátem provedeno třikrát, aby bylo možné odhadnout vhodný čas vyvolání pro 9hm.% PMMA 6000RPM a jeho tloušťku 354 nm.

Celková tloušťka rezistu byla mechanickým profilometrem stanovena na 354 nm. Všechny hodnoty nad tuto hodnotou byly považovány za 100% úbytek polymerního rezistu.

Tabulka 7 Expoziční hodnoty citlivostních testů 9hmot.% PMMA 6000RPM A, B, C a vývojkou n-amylacetát

	TEST A	TEST B	TEST C
PC [pA]	41,61	152,38	382,12
Velikost stopy [nm]	35,68	57,26	76,81
Krok DA přev.	43,26	43,26	43,26
Čas v bodě [μs]	1,53	1,08	0,8
Dávka [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	5	5	5
Překryv	1	1	1,02
Rozteč [nm]	35,68	57,26	78,35
Z [mm]	4	4	4

Tabulka 8 Naměřené hodnoty úbytku polymerní vrstvy pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývoju n-amylacetát 120s

Dávka D_0 [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	log D_0	Test A		Test B		Test C	
		úbytek t [nm]	t relativní	úbytek t [nm]	t relativní	úbytek t [nm]	t relativní
5	0,70	4	0,99	0	1	0	1
10	1,00	6	0,98	0	1	3	0,99
15	1,18	14	0,96	5	0,99	11	0,97
20	1,30	23	0,94	18	0,95	21	0,94
25	1,40	33	0,91	33	0,91	34	0,90
30	1,48	42	0,88	46	0,87	45	0,87
35	1,54	63	0,82	64	0,82	67	0,81
40	1,60	91	0,74	90	0,75	84	0,76
45	1,65	125	0,65	128	0,64	107	0,70
50	1,70	168	0,53	172	0,51	138	0,61
55	1,74	240	0,32	236	0,33	173	0,51
60	1,78	327	0,08	322	0,09	209	0,41
65	1,81	351	0*	360	0*	248	0,30
70	1,85	357	0*	361	0*	286	0,19
75	1,88	352	0*	364	0*	331	0,06

(*100% úbytek vrstvy viditelný optickým mikroskopem a změřen mechanickým profilometrem)

Tabulka 9 Naměřené hodnoty úbytku polymerní vrstvy pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývoju n-amylacetát 120s+120s

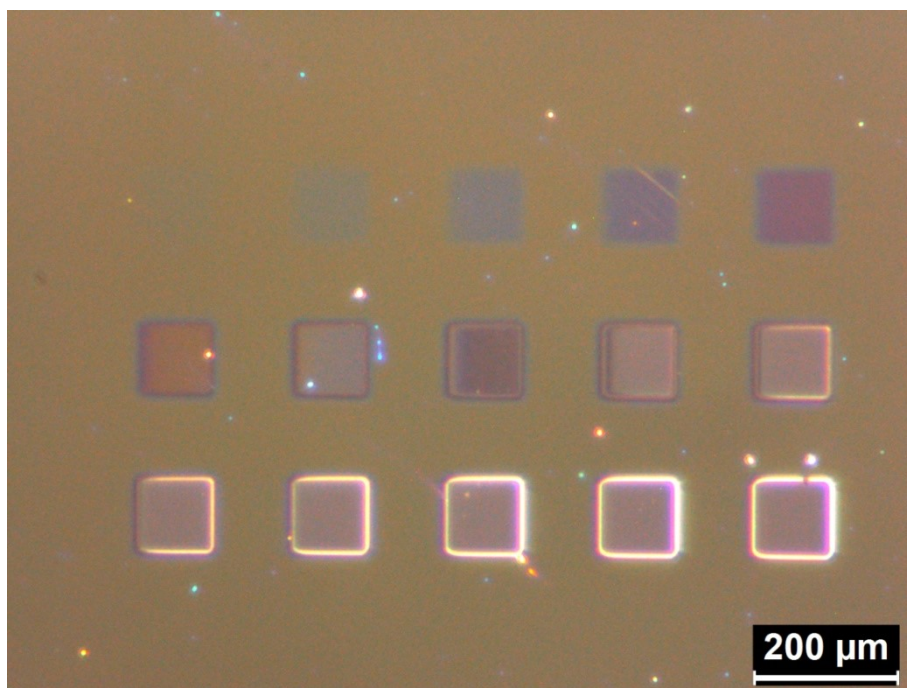
Dávka D_0 [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	log D_0	Test A		Test B		Test C	
		úbytek t [nm]	t relativní	úbytek t [nm]	t relativní	úbytek t [nm]	t relativní
5	0,70	2	0,994350282	6	0,983051	5	0,985876
10	1,00	22	0,937853107	21	0,940678	23	0,935028
15	1,18	37	0,895480226	39	0,889831	46	0,870056
20	1,30	51	0,855932203	60	0,830508	49	0,861582
25	1,40	69	0,805084746	83	0,765537	82	0,768362
30	1,48	113	0,68079096	118	0,666667	103	0,70904
35	1,54	170	0,519774011	167	0,528249	158	0,553672
40	1,60	235	0,336158192	230	0,350282	206	0,418079
45	1,65	305	0,138418079	308	0,129944	238	0,327684
50	1,70	366	0*	369	0*	308	0,129944
55	1,74	365	0*	366	0*	358	0*
60	1,78	369	0*	375	0*	360	0*
65	1,81	370	0*	376	0*	361	0*
70	1,85	370	0*	369	0*	356	0*
75	1,88	362	0*	370	0*	359	0*

(*100% úbytek vrstvy viditelný optickým mikroskopem a změřen mechanickým profilometrem)

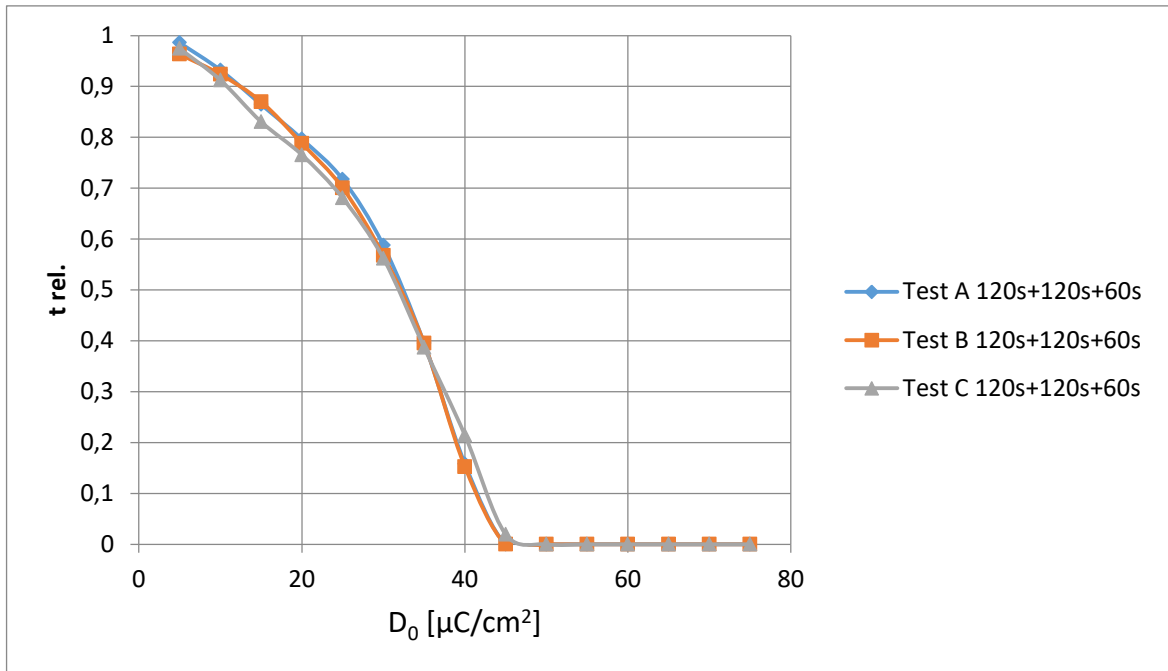
Tabulka 10 Naměřené hodnoty úbytku polymerní vrstvy pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojků n-amylnacetát 120s+120s+60s

Dávka D_0 [$\mu\text{C}/\text{cm}^2$]	log D_0	Test A		Test B		Test C	
		úbytek t [nm]	t relativní	úbytek t [nm]	t relativní	úbytek t [nm]	t relativní
5	0,70	5	0,985876	13	0,963277	9	0,974576
10	1,00	24	0,932203	27	0,923729	31	0,912429
15	1,18	48	0,864407	46	0,870056	60	0,830508
20	1,30	72	0,79661	75	0,788136	83	0,765537
25	1,40	100	0,717514	106	0,700565	113	0,680791
30	1,48	146	0,587571	153	0,567797	155	0,562147
35	1,54	214	0,39548	214	0,39548	217	0,387006
40	1,60	298	0,158192	300	0,152542	278	0,214689
45	1,65	364	0*	362	0*	347	0,019774
50	1,70	361	0*	361	0*	358	0*
55	1,74	356	0*	360	0*	360	0*
60	1,78	361	0*	368	0*	360	0*
65	1,81	363	0*	361	0*	359	0*
70	1,85	366	0*	363	0*	358	0*
75	1,88	363	0*	363	0*	357	0*

(*100% úbytek vrstvy viditelný optickým mikroskopem a změřen mechanickým profilometrem)

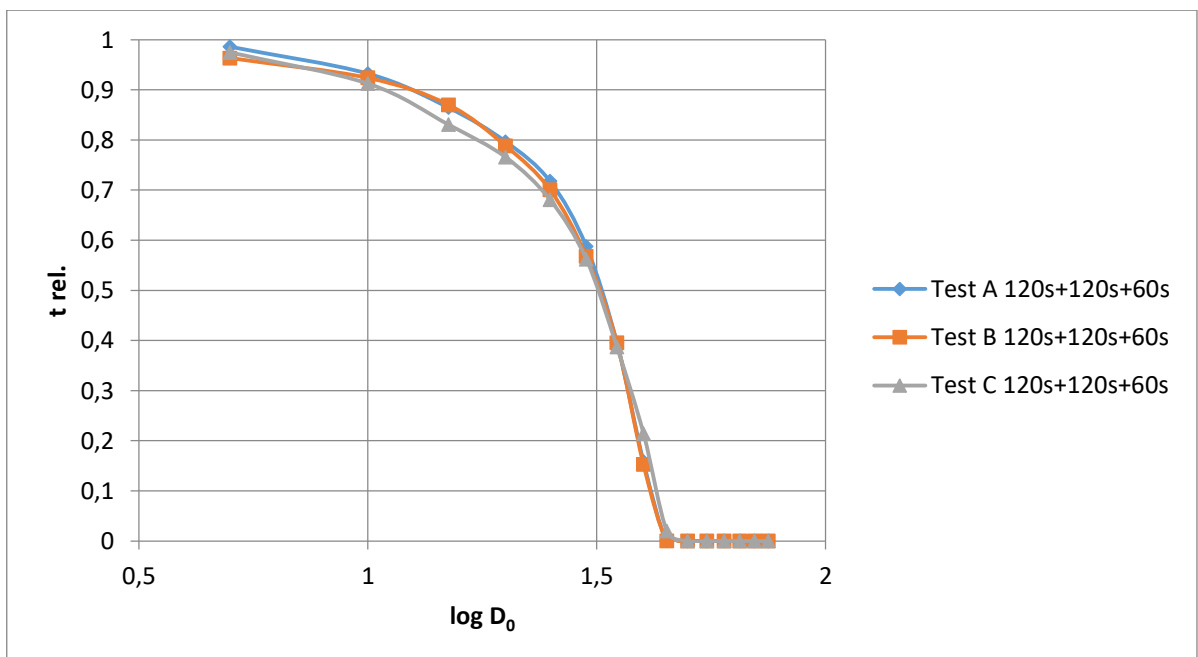


Obrázek 23 Ukázka citlivostního testu A pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojků n-amylnacetát 120s+120s+60s



Obrázek 24 Citlivostní křivka pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojkou n-amylnacetát 120s+120s+60s

- Citlivost rezistu u testů A, B, C 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojkou n-amylnacetát 120s+120s+60s je 45 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$.



Obrázek 25 Kontrastní křivka pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojkou n-amylnacetát 120s+120s+60s

4.6 Kontrast u 9hm.% PMMA 6000RPM pro citlivostní testy A, B, C

V kapitole 2.6 je podrobně popsána problematika kontrastu polymerních rezistů. Kontrast byl spočítán z absolutní hodnoty směrnice přímky pro testy A, B, C 9hm.% PMMA 6000RPM.

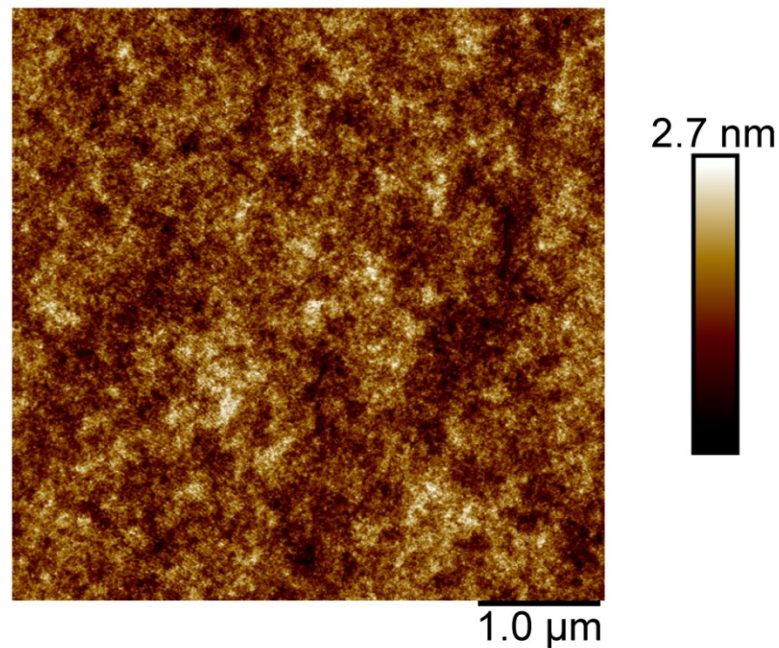
Získané hodnoty kontrastu :

- Test A : $\gamma_A = 3,4$
- Test B : $\gamma_B = 3,3$
- Test C : $\gamma_C = 3,1$

Hodnoty kontrastu u jednotlivých testů se téměř neliší a výsledné struktury nejsou ovlivněny velikostí stopy elektronového svazku, který je použit k expozici.

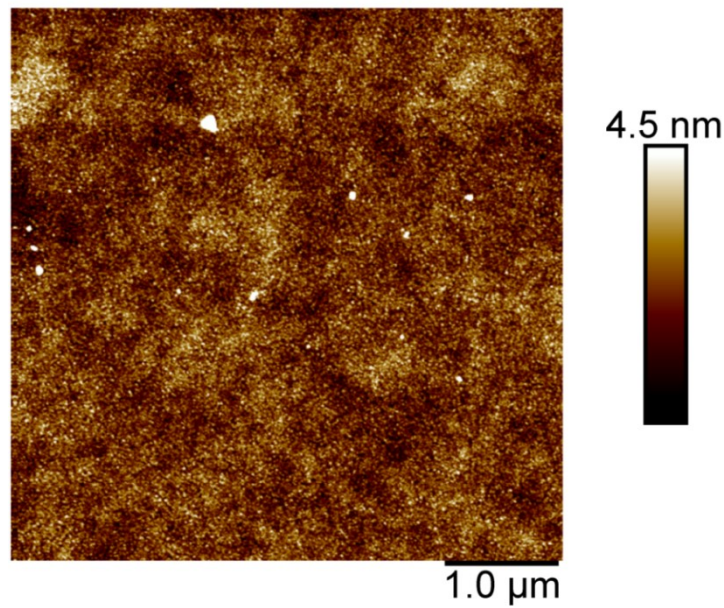
4.7 AFM – mikroskop atomárních sil

Na mikroskopu atomárních sil bylo provedeno měření povrchu u nevyvolané vrstvy rezistu, vyvolané vrstvy rezistu 9hmot.% PMMA 6000RPM, křemíkového substrátu po expozici a vyvolání citlivostního testu.



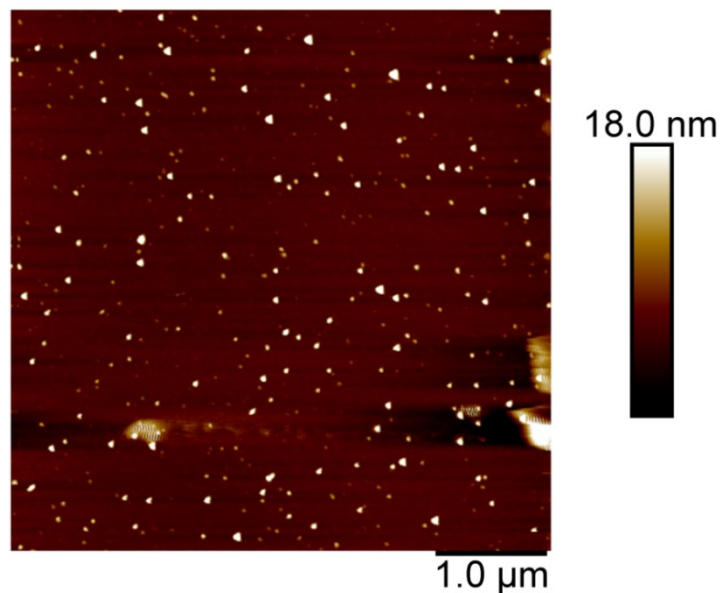
Obrázek 26 Nevyvolaná polymerní vrstva 9hm.% PMMA 6000RPM

- Pomocí AFM je možné vidět na obrázku č. 26, že výška neexponovaného polymerního rezistu PMMA se v některých místech liší až o 2,7 nm.



Obrázek 27 Polymerní vrstva 9hm.% PMMA 6000RPM po vyvolání 120s+120s+60s n-amylacetátem

- Z obrázků č.26 a č. 27 je vidět, že po vyvolání polymerního rezistu došlo ke zvýšení drsnosti povrchu polymerního materiálu.



Obrázek 28 Povrch křemíkového substrátu po expozici a vyvolání u 9hm.% PMMA 6000RPM 120s+120s+60s n-amylacetát

- Na obrázku č. 28 je vidět povrch křemíku u citlivostního testu s viditelnými rezidui polymeru PMMA po vyvolání n-amylacetátem.

ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce se věnuje základním principům elektronové litografie, popisu hlavních součástí zápisových zařízení, jejich typům, typům svazků a interakci elektronů v pevné látce. Pozornost je také soustředěna na přehled základních rezistů, jejich vlastností a popis jednotlivých technologických kroků během expozice elektronovým svazkem.

Praktická část se zaměřuje na přípravu mikro a nanostruktur pomocí elektronové litografie v polymerním rezistu PMMA na křemíkovém substrátu. Pomocí elektronového svazku byly exponovány testovací struktury, které byly vyhodnoceny mechanickým profilometrem, optickým mikroskopem a AFM .

Čistota křemíkového substrátu vysoce ovlivňovala podobu naneseného polymerního rezistu, kdy při nedostatečné čistotě docházelo k nerovnoměrné distribuci tloušťky polymerní vrstvy a vzniku defektů, proto je nutné substrát před nanášením polymerní vrstvy chemicky ošetřit.

Metodou spincoatingu byly na ošetřené křemíkové substráty nanесeny vrstvy PMMA z roztoků s různou hmotnostní koncentrací PMMA v anisolu. Tloušťky nanesených vrstev byly změřeny optickým profilometrem. Připravené vrstvy na křemíkovém substrátu byly exponovány elektronovým svazkem a z navržených citlivostních testů byly určeny správné dávky expozice a vhodné vývojky. Z citlivostních a kontrastních křivek plyne, že různé velikosti stopy svazku měly velmi zanedbatelný vliv na citlivost a kontrast rezistu.

Byla změřena topografie pomocí AFM na neexponovaném rezistu, exponovaném rezistu a kompletně vyvolaném rezistu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] RAI-CHOUDHURY, P. *Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication*. London, UK: Institution of Electrical Engineers, c1997. IEE materials & devices series, 12A-12B. ISBN 0819423793.

[2] Piqué, Alberto Chrisey, Douglas B.. (2002). *Direct-Write Technologies for Rapid Prototyping Applications - Sensors, Electronics, and Integrated Power Sources - 11.3.2 Lenses for Electron Optics*. Elsevier. Dostupné z:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009Y2SB1/direct-write-technologies/lenses-electron-optics>

[3] Elektronové magnetické čočky. In: *Central Microscopy Research Facility, The University of Iowa* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z:
<https://cmrf.research.uiowa.edu/transmission-electron-microscopy>

[4] Helbert, J.N.. (2001). *Handbook of VLSI Microlithography - Principles, Technology and Applications (2nd Edition) - 7.3.2.3 Apertures*. William Andrew Publishing/Noyes. Dostupné z:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00599AU1/handbook-vlsi-microlithography/apertures>

[5] Helbert, J.N.. (2001). *Handbook of VLSI Microlithography - Principles, Technology and Applications (2nd Edition) - 7.3.2.6 Beam Deflection*. William Andrew Publishing/Noyes. Dostupné z:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00599AX1/handbook-vlsi-microlithography/electron-optical-beam-deflection>

[6] Helbert, J.N.. (2001). *Handbook of VLSI Microlithography - Principles, Technology and Applications (2nd Edition) - 7.3.2.4 Beam Blanking*. William Andrew Publishing/Noyes. Dostupné z:
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00599AV1/handbook-vlsi-microlithography/electron-optical-beam-blanking>

[7] Prakash, Shaurya Yeom, Junghoon. (2014). *Nanofluidics and Microfluidics - Systems and Applications - 4.2.2 Electron Beam Lithography*. Elsevier. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U8CE95/nanofluidics-microfluidics/electron-beam-lithography>

[8] Levinson, Harry J.. (2010). *Principles of Lithography (3rd Edition) - 7.4 Electron-Beam Lithography and Mask Writers*. SPIE. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BK9S85/principles-lithography/electron-beam-lithography>

[9] Helbert, J.N.. (2001). *Handbook of VLSI Microlithography - Principles, Technology and Applications (2nd Edition) - 7.2.2.2 Electron Scattering*. William Andrew Publishing/Noyes. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00599AD4/handbook-vlsi-microlithography/electron-scattering>

[10] Colpaert, Hubertus. (2018). *Metallography of Steels - Interpretation of Structure and the Effects of Processing - 6.1.2 Backscattered Electrons*. (pp. 90). ASM International.

Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011QKEI1/metallography-steels/backscattered-electrons>

[11] MOHAMMAD, Mohammad Ali, Mustafa MUHAMMAD, Steven K. DEW a Maria STEPANOVA. Fundamentals of Electron Beam Exposure and Development. STEPANOVA, Maria a Steven DEW, ed. *Nanofabrication* [online]. Vienna: Springer Vienna, 2012, 2012-10-4, s. 11-41 [cit. 2020-05-03]. DOI: 10.1007/978-3-7091-0424-8_2. ISBN 978-3-7091-0423-1. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-7091-0424-8_2

[12] Campbell, Stephen A.. (2008). *Fabrication Engineering at the Micro- and Nanoscale (3rd Edition) - 9.2 Direct-Write Electron Beam Lithography Systems*. Oxford University Press. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008MXZR2/fabrication-engineering/direct-write-electron>

- [13] Colpaert, Hubertus. (2018). *Metallography of Steels - Interpretation of Structure and the Effects of Processing - 6.1.1 Secondary Electrons*. ASM International. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011QKEH1/metallography-steels/secondary-electrons>
- [14] Dudley, Richard A. Fiddy, Michael A.. (2017). *Engineered Materials and Metamaterials - Design and Fabrication - 9.3.1 Electron Beam Lithography*. SPIE. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011EQWE1/engineered-materials/electron-beam-lithography>
- [15] Levinson, Harry J.. (2010). *Principles of Lithography (3rd Edition) - 7.4 Electron-Beam Lithography and Mask Writers*. SPIE. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BK9S85/principles-lithography/electron-beam-lithography>
- [16] Raith EBL system installed at Cambridge University [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <http://www.emsys.co.uk/raith-eb1-system-installed-at-cambridge-university/>
- [17] Baldacchini, Tommaso. (2016). *Three-Dimensional Microfabrication Using Two-Photon Polymerization - Fundamentals, Technology, and Applications - 13.2.2.3 Charged-Particle Lithography*. Elsevier. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00URVX81/three-dimensional-microfabrication/charged-particle-lithography>
- [18] Helbert, J.N.. (2001). *Handbook of VLSI Microlithography - Principles, Technology and Applications (2nd Edition) - 7.3.3.3 Beam Shape*. William Andrew Publishing/Noyes. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00599B33/handbook-vlsi-microlithography/beam-shape>
- [19] O'Shea, Donald C. Suleski, Thomas J. Kathman, Alan D. Prather, Dennis W.. (2004). *Diffractive Optics - Design, Fabrication, and Test - 11.3.1 Focusing Beam Shapers*. SPIE.

[20] Electron Beam Lithography (EBL) for High-Volume Manufacturing - ppt download. *SlidePlayer - Upload and Share your PowerPoint presentations* [online].

Copyright © 2020 SlidePlayer.com Inc. [cit. 03.05.2020]. Autor: Paul Meyer

Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/13806508/>

[21] Labouret, Anne Villos, Michel. (2010). *Solar Photovoltaic Energy - 3.1.1.2*

Manufacture of Silicon Wafers. Institution of Engineering and Technology. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008W1GE2/solar-photovoltaic-energy/manufacture-silicon-wafers>

[22] Levinson, Harry J.. (2010). *Principles of Lithography (3rd Edition) - 3.1 Positive and Negative Resists*. SPIE. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BK9QXA/principles-lithography/positive-negative-resists>

[23] BARRON, Andrew R. Comparison of positive and negative photoresists. In: *Openstax CNX* [online]. Andrew R. Barron, 2009 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z:

<https://cnx.org/resources/ef0422208fbb85a1d99f7f13ef5b246fb0670a34/graphics5.jpg>

[24] Poly(methyl methacrylate). In: *Sigma Aldrich* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z:

<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/445746?lang=en@ion=CZ>

[25] ZHU, Mingsai, Chongyu MEI, Jianan DENG, Yuying XIE a Yifang CHEN.

Evaluation of RE-650 as a positive tone resist for electron beam lithography with high

plasma etch durability. *Microelectronic Engineering* [online]. 2020, **227** [cit. 2020-05-03].

DOI: 10.1016/j.mee.2020.111271. ISSN 01679317. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167931720300599>

[26] Nguyen, Nam-Trung. (2008). *Micromixers - Fundamentals, Design and Fabrication - 3.2.1.2 SU-8 Resist*. William Andrew Publishing. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt006R3P92/micromixers-fundamentals/su-8-resist>

[27] SU-8 photoresist. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2009 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/SU-8_photoresist#/media/File:SU-8_photoresist.png

[28] MATĚJKA, František. *Praktická elektronová litografie*. Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, 2013. ISBN 978-80-87441-04-6.

[29] Helbert, J.N.. (2001). *Handbook of VLSI Microlithography - Principles, Technology and Applications (2nd Edition) - 2.4.1.25 Softbake*. William Andrew Publishing/Noyes.

Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00599192/handbook-vlsi-microlithography/softbake>

[30] YASIN, Shazia, D.G. HASKO a H. AHMED. Comparison of MIBK/IPA and water/IPA as PMMA developers for electron beam nanolithography. *Microelectronic Engineering* [online]. 2002, **61-62**, 745-753 [cit. 2020-05-03]. DOI: 10.1016/S0167-9317(02)00468-9. ISSN 01679317. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167931702004689>

[31] Levinson, Harry J.. (2010). *Principles of Lithography (3rd Edition) - 3.3 Resist Spin Coating, Softbake, and Hardbake*. SPIE. Dostupné z:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00BK9QZ3/principles-lithography/resist-spin-coating-softbake>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EBL	Elektronová litografie (v angl. Electron-beam lithography)
FE	Emise pole (v angl. Field Emission)
R&D	Výzkum a vývoj (v angl. Research and Development)
PMMA	Polymethylmetakrylát
IPA	Isopropylalkohol (2-propanol)
MIBK	Methylisobutylketon
RE-650	Kopolymer methylester kyseliny 2-chlorakrylové a alfa-methylstyrenu
SU-8	Fotorezist složený z bisfenolu A a org. rozp. gamma-butyrolaktonu nebo cyklopentanon a fotoinciátoru
COP	Epoxidový kopolymer ethylakrylátu a glycidyl metakrylátu (GMA-co-EA)
RPM	Otáčky za minutu (v angl. Revolutions per Minute)
AFM	Mikroskop atomových sil (v angl. Atomic force microscope)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma magnetické čočky [3]	13
Obrázek 2 Interakce elektronového svazku s rezistem a substrátem [8].....	15
Obrázek 3 Rozšiřování elektronové svazku z důvodu dopředného rozptylu elektronů při energii 10 keV [11]	16
Obrázek 4 Trajektorie rozptýlených elektronů ve vzorku [12]	17
Obrázek 5 Obecný popis zařízení elektronového litografu [15]	18
Obrázek 6 Jednoúčelový EBL systém Raith EBP5200 [16]	18
Obrázek 7 Vzhled Gaussovského svazku [20]	20
Obrázek 8 Vzhled tvarovaného svazku [20]	21
Obrázek 9 (a) požadovaná plocha expozice, (b) rastrový zápis struktury, (c) vektorový zápis struktury [8]	21
Obrázek 10 Srovnání pozitivního a negativního rezistu [23].....	23
Obrázek 11 Strukturní vzorec PMMA [24].....	24
Obrázek 12 (a) Závislost tloušťky rezistu na otáčkách, (b) závislost relativní tloušťky na expoziční dávce, vývojka o-xylen [25].....	25
Obrázek 13 Strukturní vzorec negativního fotorezistu SU-8 [27].....	26
Obrázek 14 Obecná kontrastní křivka rezistu [28].....	27
Obrázek 15 Měření na mechanickém profilometru Bruker DektakXT (zelené pole – vryp pinzetou až na substrát, červené pole – tloušťka vzorku Si+PMMA)	32
Obrázek 16 Závislost tloušťky PMMA v anisolu na RPM pro 3hm.%; 6hm.%; 9hm.%... 33	
Obrázek 17 Nastavení hodnot citlivostního testu v programu VegaTC.....	34
Obrázek 18 Schéma citlivostního testu s počtem přeběhů	35
Obrázek 19 Citlivostní křivka pro 6hmot.% PMMA 3000RPM pro vývojku n-amylacetát 60s a MIBK:IPA 1:3 120s	37
Obrázek 20 Kontrastní křivka pro 6hmot.% PMMA 3000RPM pro vývojku n-amylacetát 60s a MIBK:IPA 1:3 120s	38
Obrázek 21 Citlivostní test pro 6hmot.% PMMA 3000RPM a vývojku n-amylacetát 60s	39
Obrázek 22 Citlivostní test pro 6hmot.% PMMA 3000RPM a vývojku IPA:MIBK 3:1 120s.....	39
Obrázek 23 Ukázka citlivostního testu A pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojku n-amylacetát 120s+120s+60s.....	42
Obrázek 24 Citlivostní křivka pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojku n-amylacetát 120s+120s+60s	43
Obrázek 25 Kontrastní křivka pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojku n-amylacetát 120s+120s+60s	43
Obrázek 26 Nevyvolaná polymerní vrstva 9hm.% PMMA 6000RPM.....	45

Obrázek 27 Polymerní vrstva 9hm.% PMMA 6000RPM po vyvolání 120s+120s+60s n-amylacetátem	46
Obrázek 28 Povrch křemíkového substrátu po expozici a vyvolání u 9hm.% PMMA 6000RPM 120s+120s+60s n-amylacetát	46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti elektronových zdrojů (emitorů) [1].....	12
Tabulka 2 Hodnoty citlivosti a kontrastu u PMMA pro různé typy vývojek [30]	28
Tabulka 3 Konstantní hodnoty pro metodu spincoating.....	31
Tabulka 4 Naměřená tloušťka rezistu z 3hm.%; 6hm.% a 9hm.% roztoku PMMA při určitých otáčkách (RPM).....	33
Tabulka 5 Expoziční hodnoty citlivostních testů 6hm.% PMMA 3000RPM určených pro vývojky n-amylacetát a MIBK:IPA 1:3 120s	35
Tabulka 6 Naměřené úbytky tlouštěk u 6hmot.% PMMA 3000RPM pro vývojku n-amylacetát 60s a MIBK:IPA 1:3 120s	36
Tabulka 7 Expoziční hodnoty citlivostních testů 9hmot.% PMMA 6000RPM A, B, C a vývojku n-amylacetát.....	40
Tabulka 8 Naměřené hodnoty úbytku polymerní vrstvy pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojku n-amylacetát 120s	41
Tabulka 9 Naměřené hodnoty úbytku polymerní vrstvy pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojku n-amylacetát 120s+120s	41
Tabulka 10 Naměřené hodnoty úbytku polymerní vrstvy pro 9hmot.% PMMA 6000RPM a vývojku n-amylacetát 120s+120s+60s.....	42