

Příprava struktur přes masku z polymerního rezistu

Zdeněk Dvořák

Bakalářská práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Zdeněk Dvořák
Osobní číslo: T22920
Studijní program: B0711A130009 Materiály a technologie
Specializace: Materiálové inženýrství
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Příprava struktur přes masku z polymerního rezistu

Zásady pro vypracování

1. Literární rešerše – litografické techniky a lift-off proces.
2. Příprava struktur lift-off procesem.
3. Charakterizace připravených struktur.
4. Vyhodnocení výsledků a diskuze.
5. Formulace závěru.

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

Seznam doporučené 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. S. NONOGAKI, T. UENO and T. ITO, Microlithography Fundamentals in Semiconductor Devices and Fabrication Technology: Plastics Engineering, 336 pages, CRC Press 1998, ISBN: 978-0824799519.

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

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2024**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

Ing. Petr Smolka, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 20. února 2024

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 užit 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 bakalářská práce se zaměřuje na techniku přípravy struktur pomocí procesu lift-off. V teoretické části je vysvětlen princip fungování různých litografických technik a metod depozice cílového materiálu. Součástí praktické části je příprava polymerních masek pomocí elektronové litografie na křemíkovém substrátu a polyimidové fólii. Na základě měření tloušťky vrstev mechanickým profilometrem byly pro přípravu polymerní masky zvoleny roztoky připravené z PMMA o vyšší a nižší molární hmotnosti. Přes masky byly na křemíkovém substrátu lift-off procesem vytvořeny vodivé struktury z vrstvy Ag. Charakterizace struktur byla provedena pomocí optické mikroskopie, mechanické profilometrie a skenovací elektronové mikroskopie. Při charakterizaci byl kladen důraz na porovnání velikostí výsledných rozměrů struktur.

Klíčová slova: litografické techniky, elektronová litografie, lift-off proces, polymerní rezist

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on the technique of preparing structures using the lift-off process. The theoretical part explains the principle of various lithographic techniques and methods of deposition of target material. The practical part includes the preparation of polymer masks by electron beam lithography on silicon substrate and polyimide film. Based on layer thickness measurements using a mechanical profilometer, solutions prepared from PMMA of higher and lower molar mass were selected for polymer mask preparation. Using the masks, conductive Ag structures were prepared on the silicon substrate by a lift-off process. Characterization of the structures was performed by optical microscopy, mechanical profilometry and scanning electron microscopy. The comparison of the size of the structures was the main focus of the characterisation.

Keywords: lithographic techniques, electron-beam lithography, lift-off process, polymer resist

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Mgr. Michalu Urbánkovi, Ph.D. za trpělivost a čas, který mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 LITOGRAFICKÉ TECHNIKY.....	12
1.1 OPTICKÁ LITOGRAFIE	12
1.1.1 Vlnové délky	13
1.1.2 Iluminační systém	14
1.1.3 Fotomaska	14
1.1.4 Projekční čočka	15
1.1.5 Imerzní litografie.....	15
1.1.6 Extreme ultraviolete (EUV) litografie	15
1.2 RENTGENOVÁ LITOGRAFIE	16
1.2.1 Zdroj rentgenového záření	17
1.2.2 Masky pro rentgenovou litografii.....	17
1.3 ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE	18
1.3.1 Zdroj elektronů.....	19
1.3.2 Elektronové čočky.....	19
1.3.3 Zatemňovací technika a apertury	19
1.3.4 Interakce elektron-pevná látka	20
1.3.5 Elektronový svazek	21
1.4 IONTOVÁ LITOGRAFIE.....	21
1.4.1 Zdroje iontů.....	22
1.5 DALŠÍ LITOGRAFICKÉ TECHNIKY	23
1.5.1 Nanoimprint litografie.....	23
1.5.2 Laserová interferenční litografie	23
1.5.3 Directed self-assembly	23
2 POLYMERNÍ REZISTY.....	24
2.1 POZITIVNÍ A NEGATIVNÍ POLYMERNÍ REZIST	24
2.2 SPIN COATING.....	25
3 LIFT-OFF PROCES	26
3.1 METODY NANÁŠENÍ CÍLOVÉHO MATERIÁLU	27
3.1.1 CVD	27
3.1.2 PVD.....	27
3.1.3 ALD.....	28
3.1.4 MBE	28
3.2 STRUKTURY PŘIPRAVOVANÉ METODOU LIFT-OFF	28
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	29
4 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE, PŘÍSLUŠENSTVÍ A PŘÍSTROJE	30
4.1 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE.....	30

4.2	SUBSTRÁTY	30
4.3	PŘÍSTROJE	30
5	PŘÍPRAVA VRSTEV POLYMERNÍHO REZISTU PMMA	31
5.1	PŘÍPRAVA KŘEMÍKOVÉHO SUBSTRÁTU	31
5.2	PŘÍPRAVA SUBSTRÁTU Z POLYIMIDOVÉ FOLIE	32
5.3	PŘÍPRAVA POLYMERNÍHO ROZTOKU PMMA	32
5.4	NANESENÍ VRSTVY POLYMERNÍHO REZISTU PMMA NA SUBSTRÁT	32
5.5	MĚŘENÍ TLOUŠTKY VRSTVY POLYMERNÍHO REZISTU	33
6	CITLIVOSTNÍ TESTY	35
6.1	CITLIVOSTNÍ TESTY NA KŘEMÍKOVÉM SUBSTRÁTU	36
6.1.1	Polymerní vrstva z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM.....	36
6.1.2	Polymerní vrstva z 20 %hm. 15 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM.....	38
6.2	CITLIVOSTNÍ TESTY NA POLYAMIDOVÉ FÓLII.....	39
6.2.1	Polymerní vrstva z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM.....	39
6.2.2	Polymerní vrstva z 20 %hm. 15 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM.....	40
7	ZÁPIS STRUKTUR A LIFT-OFF PROCES	41
7.1	ZÁPIS NA KŘEMÍK	42
7.1.1	Zápis do polymerní vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM	42
7.1.2	Zápis do polymerní vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM	43
7.2	ZÁPIS NA POLYIMIDOVOU FÓLII	43
7.3	LIFT-OFF.....	44
8	CHARAKTERIZACE PŘIPRAVENÝCH STRUKTUR.....	45
8.1	OPTICKÁ MIKROSKOPIE	45
8.1.1	Ag struktury naprášené přes masku z polymerní vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM	45
8.1.2	Ag struktury naprášené přes masku z polymerní vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM	46
8.2	MECHANICKÁ PROFILOMETRIE	47
8.2.1	Struktury typu A.....	47
8.2.2	Struktury typu B.....	48
8.2.3	Struktury typu C.....	48
8.3	SEM.....	49
8.3.1	Struktury z Ag naprášené přes masku z polymerní vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM	49
8.3.2	Struktury z Ag naprášené přes masku z polymerní vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol ⁻¹ PMMA 6000 RPM	50
8.3.3	Rozměry vodivých linek	51
8.3.4	Struktury typu A.....	51

8.3.5	Struktury typu B	51
8.3.6	Struktura typu C	52
8.4	SROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH ROZMĚRŮ NA ZÁKLADĚ ZPŮSOBU CHARAKTERIZACE	52
ZÁVĚR		54
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		55
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		58
SEZNAM OBRÁZKŮ		60
SEZNAM TABULEK		62

ÚVOD

Termín litografie je složen z řeckých slov lithos – kámen a grafein – psát. Do českého jazyka ho lze přeložit jako kamenotisk. Byl vynalezen roku 1796 Němcem Aloisem Senefelderem a stal se významnou tiskovou technikou.

V kontextu výroby a vývoje polovodičových součástek jako jsou integrované obvody, procesory a čipy, jsou důležité metody umožňující připravovat struktury o velikostech v řádech mikrometrů a nanometrů. Při použití polymerního rezistu je obraz požadované struktury nejprve zapsán do vrstvy rezistu nanesené na substrát pomocí zdroje energie, kdy dochází k posilování nebo oslabování chemických vazeb v závislosti na povaze rezistu. Následná finální struktura je vyvolána pomocí vývojky – rozpouštědla, kterým jsou odstraněny exponované nebo neexponované části rezistu. Podle typu zdroje energie lze litografické techniky rozdělit na fotolitografii neboli optickou litografii, elektronovou litografii (EBL) a iontovou litografii (IBL). Jednotlivé metody nachází uplatnění v závislosti na velikosti požadované struktury a cenové náročnosti procesu výroby. Pomocí EBL a IBL lze dosáhnout rozměrů menších než 10 nm a bývají využívány při výrobě a vývoji prototypů, struktur s velmi vysokým rozlišením a masek pro optickou litografii. Zatímco optická litografie se díky své nižší finanční náročnosti používá i pro masovou výrobu polovodičových součástek.

V poslední době dochází k rozvoji dalších litografických technik jako jsou například nanoimprint lithografie (NIL), laserová interferenční litografie (LIL) a chemical-based direct self-assembly (DSA). Jedná se o rychlé techniky nanášení vrstvy, kterými lze dosáhnout velmi malých rozměrů struktur. Přesto však klasická optická litografie zůstává na první příčce pomyslného žebříčku využití litografických technik.

Samotný lift-off proces zahrnuje i nanesení vrstvy materiálu, typicky vodivého kovu jako je stříbro nebo zlato, na masku z polymerního rezistu vytvořenou pomocí litografické techniky. Maska je následně odstraněna a s ní i materiál na ní nanesený. Výslednou strukturou je tedy vrstva vodivého materiálu, která byla nanesena přímo na substrát. Lift-off proces je alternativou k tradičnějšímu leptání v případech, kdy to není možné nebo vhodné.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LITOGRAFICKÉ TECHNIKY

V roce 1958 zkonstruovali nezávisle na sobě Američtí fyzikové Jack Kilby a Robert Noyce první integrovaný obvod. S následnou potřebou vyrábět tyto polovodičové součástky v menších velikostech a velkém množství, došlo k rozvoji litografických technik používaných k tomuto účelu. Tvorba struktur pomocí litografických technik obvykle spočívá v zápisu obrazu struktury do vrstvy polymerního rezistu na substrátu pomocí zdroje energie. Dochází k posilování nebo oslabování chemických vazeb v závislosti na povaze rezistu a finální struktura je vyvolána pomocí vývojky – rozpouštědla. V závislosti na zdroji energie lze rozlišovat různé litografické techniky.

1.1 Optická litografie

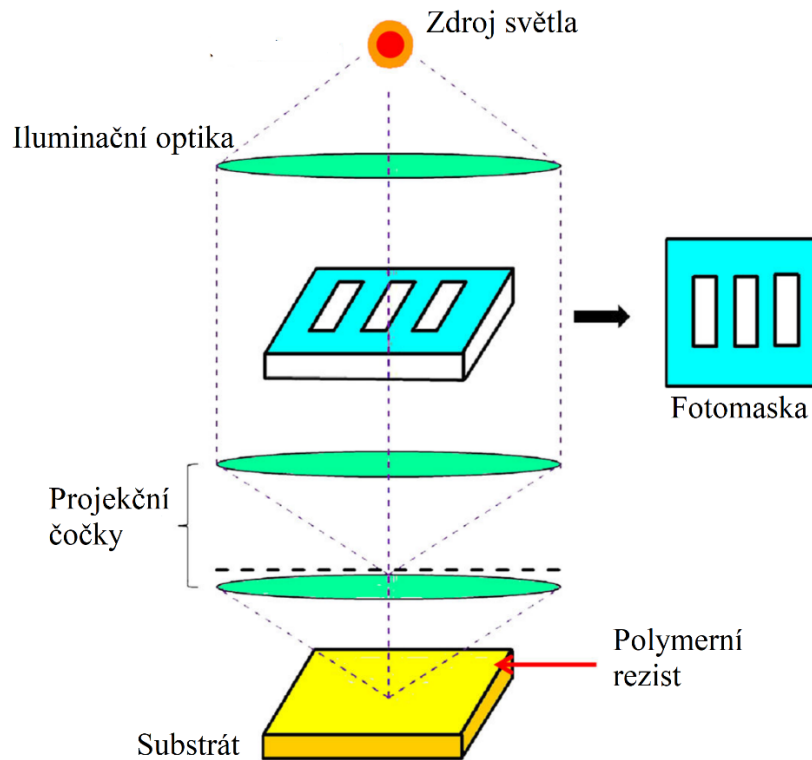
V průmyslu výroby mikroelektroniky a polovodičových součástek je optická litografie neboli fotolitografie nejpoužívanější litografickou technikou. Tradiční optická litografie využívá jako zdroj energie světlo o vlnových délkách spadajících do ultrafialové (UV) části spektra, které prochází přes fotomasku propouštějící světlo na rezist v požadovaném vzoru. V počátcích optické litografie byla maska přiložena přímo na rezist, bylo ji však nutné pravidelně po použití čistit, aby bylo zabráněno tvorbě defektů. Tento problém byl vyřešen zavedením 1:1 projekčních systémů a umístěním masky dostatečně daleko od rezistu. Rozlišení projekčního systému lze vypočítat pomocí Reylyghtovy rovnice. [1,2]

$$R = \frac{k_1 \cdot \lambda}{NA} \quad (1)$$

Kde λ je vlnová délka použitého světla, R je rozlišení, k_1 je Rayleighova konstanta a NA je numerická apertura.

Z rovnice je zřejmé, že pozitivní vliv na rozlišení má snižování vlnové délky použitého světla a zvyšování numerické apertury, kterého lze docílit využitím optických čoček. Z pohledu průmyslové výroby je nejpříjemnější metodou zlepšení rozlišení snižování k_1 faktoru pomocí technik jako použití masky s fázovým posunem, osvětlení mimo osu, optické korekce blízkosti a další. [2]

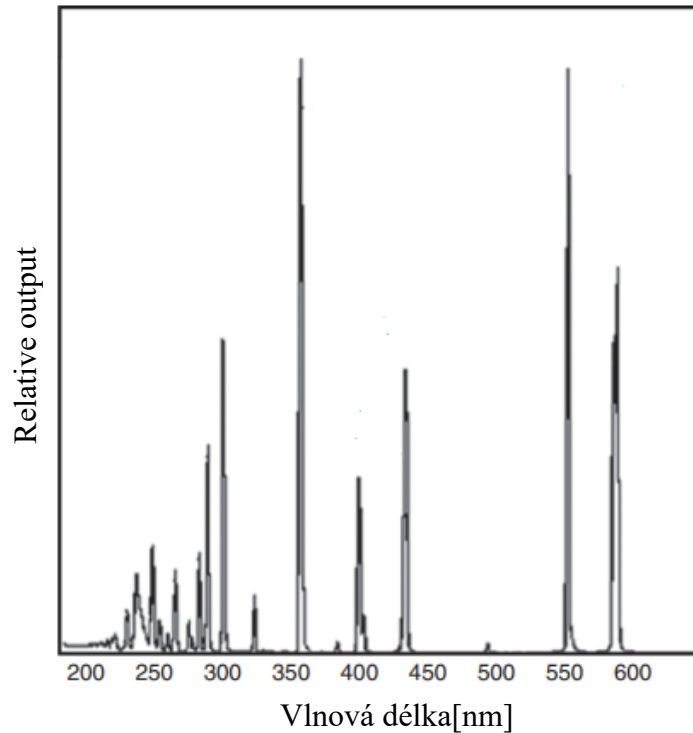
Na obr. č. 1 je zobrazeno schéma opticko-litografického systému, který se skládá ze světelného zdroje, iluminační optiky, fotomasky a projekční čočky.



Obrázek 1 - Schéma opticko-litografického systému [1]

1.1.1 Vlnové délky

Optická litografie využívá vlnové délky elektromagnetického spektra v oblasti UV. Prvními zdroji vysoce intenzivního záření v oblastech modré a UV části spektra byly rtuťové a rtuť-xenonové obloukové lampy. Emisní pásy zobrazené na obr. č. 2 jsou projevem přechodu elektronů mezi jednotlivými stavy. Pásky používané pro litografii jsou emise při 436 nm a 365 nm. Pro litografické systémy využívající hluboké ultrafialové záření (DUV) je použitelný emisní pás při 254 nm, který se nachází ve shluku slabších emisních pásů. Z důvodu slabé intenzity DUV záření (180-300 nm) obloukových lamp jsou pro tento účel nejčastěji používány zdroje využívající excimerů. Tyto zdroje lze používat jako lampy, ale vysokého výkonu je dosaženo využitím excimerového laseru. [3]



Obrázek 2 - Emisní spektrum rtuťové obloukové lampy [3]

1.1.2 Iluminační systém

Při vstupu laserového paprsku do iluminačního systému nejprve dochází k seřízení směru, pozice a intenzity pomocí směrovací jednotky. Paprsek dále vstupuje do iluminační optiky, kde je definován jeho typ iluminace, která může být buď axiální, neaxiální, kvazarová a další. Následně paprsek vstupuje do křemenné tyče, která ovlivňuje jeho koherenci. Nakonec je paprsek zaměřen na fotomasku. [4]

1.1.3 Fotomaska

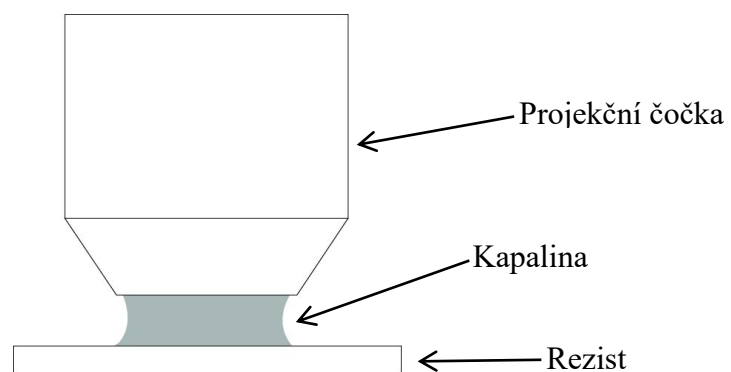
Klíčovým komponentem opticko-litografického systému je fotomaska definující vzor integrovaného obvodu, který má být replikován do polymerního rezistu. Obsahuje absorbéry a fázové posuvníky umístěné na transparentním substrátu. Materiálem ideálním pro substrát fotomasky je křemenné sklo, jelikož je propustné pro UV záření. Mezi materiály používanými pro absorbéry pohlcující UV záření se postupem času prosadil chrom díky své tvrdosti a malé tloušťce. Nevýhodou chromu je jeho reflektivita, která může snížit kontrast. [4] Preferovanou metodou k vytváření vzorů na fotomaskách je elektronová litografie. [5]

1.1.4 Projekční čočka

Obraz integrovaného obvodu definovaný fotomaskou je reprodukován s určitým redukčním poměrem na rezist pomocí systému projekčních čoček majících zásadní vliv na výsledné rozlišení. Účinnost čoček je vyjádřena numerickou aperturou (NA), která charakterizuje úhlový rozsah světla, kdy se zvyšující se NA lze provést zápis menších struktur. Počet struktur zapsaných jedním krokem je dán velikostí pole čočky. Platí tedy, že je snaha produkovat čočky s vysokou NA a velikostí pole, což má ale svoje limity, jelikož to má negativní vliv na zkreslení čoček. Na velikosti pole jsou závislé i další aberace jako jsou astigmatismus a koma. Pro dosažení vysoké NA je potřeba malá pracovní vzdálenost mezi čočkou a polymerním rezistem, která se obvykle pohybuje mezi 5 až 10 mm. [4]

1.1.5 Imerzní litografie

Zvýšení NA a tím zápisu menších struktur je možné také dosáhnout zaplněním prostoru mezi projekční čočkou a rezistem transparentní kapalinou a využít tak principu imerze. Tato technika byla patentována roku 1982, kdy byla jako médium využita kapalina se stejným indexem lomu jako fotorezist. [6]



Obrázek 3 - Schéma imerzní litografie

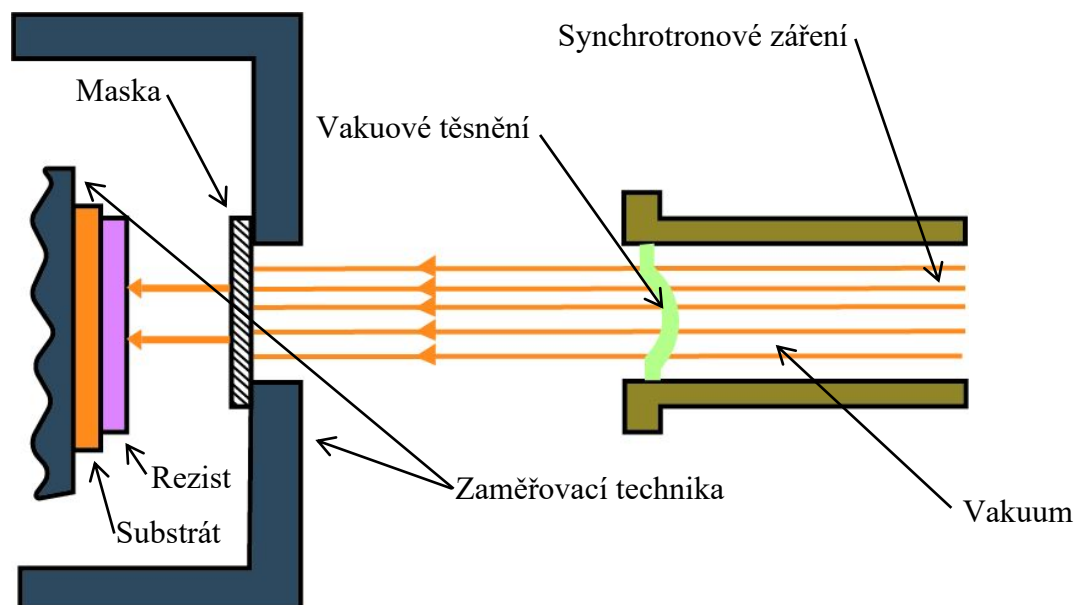
1.1.6 Extreme ultraviolete (EUV) litografie

Další možností, jak dosáhnout zmenšení struktur a tím zvětšení počtu zapsaných tranzistorů na substrát je snížení vlnové délky. EUV litografie pracuje s vlnovým zářením o délce 13,5 nm což je 15krát menší hodnota než 193 nm používaných u immerzní litografie. Způsobem, jak produkovat EUV fotony je vysokoteplotní plazma. Existují dva nejběžnější přístupy, a to výbojové zdroje plazmatu a laserové zdroje plazmatu. [7] EUV litografie je od roku 2018 používána ve vysoko produkční výrobě. [8]

1.2 Rentgenová litografie

Jak již bylo zmíněno výše, vlnová délka použitého záření má vliv na rozlišení, kterého lze pomocí litografických technik dosáhnout. Rentgenová litografie (XRL) využívá oproti klasické optické litografii kratších vlnových délek (0,1-10 nm), což umožňuje zapsat velmi přesné struktury. Pomocí XRL se podařilo snížit velikost tranzistorů na 17 nm. [1] XRL zaznamenala významný vývoj od začátku 80. let 20. století, kdy se jednalo pro průmysl výroby integrovaných obvodů o slibnou techniku díky možnosti lepšího rozlišení než u optické litografie a zároveň menší časové náročnosti procesu než u elektronové litografie. [9] Vysoké náklady spojené s konstrukcí a provozem zdrojů rentgenového záření použitelných pro XRL a nízká výkonnost oproti optické litografii omezují její průmyslové využití. Existují však specifické aplikace, pro které se XRL ukázala jako nejlepší a nejefektivnější volba. Nejvýznamnější z těchto aplikací je výroba difrakční a refrakční optiky používané v rentgenové mikroskopii, interferometrii a tomografii. [10]

Na obr. č. 4 je zobrazeno schéma rentgen-litografického systému, který na rozdíl od opticko-litografického systému neobsahuje projekční čočky. Synchrotronové záření prochází přes masku na substrát s rezistem citlivým na rentgenové záření, který je umístěn na zarovnávacím stole.



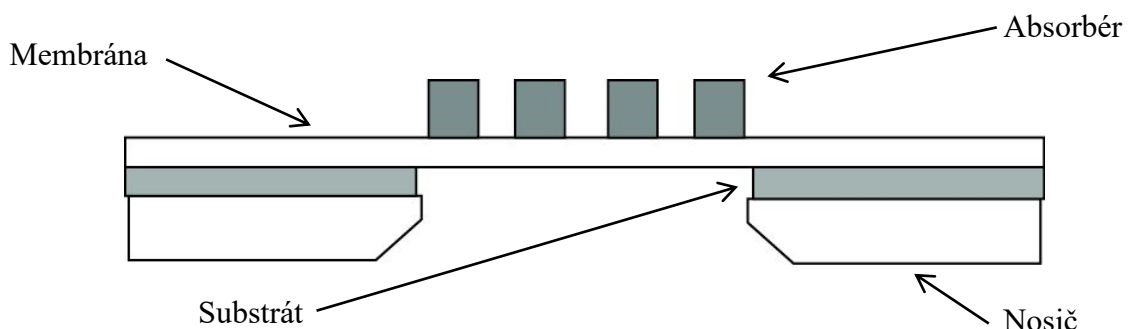
Obrázek 4 - Schéma rentgen-litografického systému [1]

1.2.1 Zdroj rentgenového záření

Ve většině rentgenových litografických systému se jako zdroj záření používají synchrotronové zdroje záření, jelikož obecně platí, že poskytují mnohem intenzivnější záření než bodové zdroje. [11] Synchrotronové záření je produkováno nabitými částicemi pohybujícími se relativistickými rychlostmi v magnetickém poli udržujícím částice na zakřivených drahách. Prakticky všechny moderní synchrotronové zdroje rentgenového záření jsou akumulární prstence, ve kterých je synchrotronové záření produkováno buď ohybovými magnety udržujícími elektrony na orbitě nebo zařízeními zvanými wiggler a undulátory, které nutí elektrony pohybovat se po oscilující trajektorii. [12]

1.2.2 Maska pro rentgenovou litografii

Masky pro XRL lze zjednodušeně popsat jako vzor z materiálu s vysokou atomovou hmotností (absorbér) nanesený na materiálu s nízkou atomovou hmotností (membrána). Materiály, z kterých jsou masky vytvořeny musí být zvoleny tak, aby odolávaly poškození rentgenovým zářením a náročnému chemickému čištění. Jako absorbéry se používají například materiály na bázi tantalu a wolframu. Membrány musí být propustné pro rentgenové záření a mohou být vyrobeny například z karbidu křemíku nebo diamatu. Vzory na masce jsou obvykle vytvořeny pomocí elektronové litografie. [13] Jelikož se u XRL nepoužívají čočky, je velmi důležité umístění substrátu a masky do přesné pozice. Toho je dosaženo pomocí zaměřovacích systémů a mechanických polohovatelných systémů. [1]

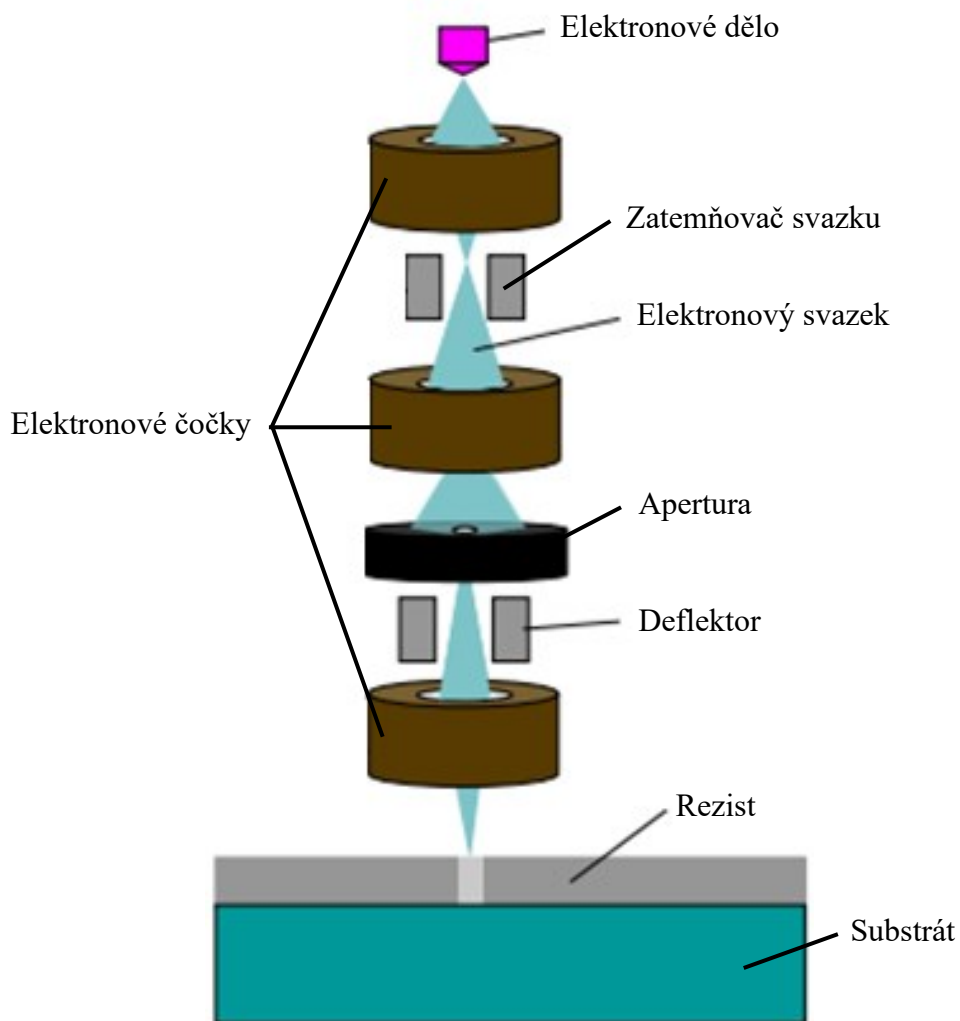


Obrázek 5 - Maska pro XRL [13]

1.3 Elektronová litografie

Elektronová litografie (EBL) využívá jako zdroj energie pro zápis struktury elektronový svazek. První elektronové litografické systémy vznikly na konci šedesátých let 20. století a vycházely z konstrukce rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM). Výhodou EBL je, že umožňuje přímý zápis elektronovým svazkem bez použití masky a je díky ní možné zapsat struktury o velikostech 10 nm i menší. Jedná se o techniku umožňující pracovat s různými materiály a zapsat de facto nekonečné množství různých obrazců, jejichž rozlišení není limitováno elektronovou optikou, nýbrž interakcemi elektronů s rezistem a podložkou, což je společně s časovou a finanční náročností procesu jedna z nevýhod EBL. [5,14,15]

Elektronový litografický systém se obvykle skládá z elektronového děla, elektronových čoček, zatemňovací techniky, apertury a vychylovacího systému (deflektoru).



Obrázek 6 - Schéma elektronového litografického systému [16]

1.3.1 Zdroj elektronů

Materiál může emitovat elektrony buď důsledkem zahřívání do takového bodu, kdy elektrony mají dostatečnou energii, aby překonaly potenciálovou bariéru anebo aplikací elektrického pole dostatečně silného, aby došlo k tunelování elektronů skrz bariéru. Elektronové dělo neboli tryska se skládá z katody z vysoce teplotně odolného materiálu, aby nedocházelo k jeho tání nebo odpařování. Tradičním materiálem pro elektronový emitore byl wolfram, který byl později z důvodu nízkého jasu a vysokého rozptylu energie nahrazen jinými materiály jako například lanthan hexaborid. [14]

1.3.2 Elektronové čočky

Existují dva typy elektronových čoček dle principu jejich fungování. Prvním typem jsou magnetické elektronové čočky udržující elektrony ve svazku pomocí magnetických sil. Jejich hlavní využití v EBL systému je v koncových projekčních čočkách, které mají největší vliv na kvalitu systému. Jsou chlazeny, aby byla udržena konstantní teplota, což je kritické pro stabilní fungování systému. Druhým typem jsou elektrostatické čočky využívající elektrostatických sil, které mají horší aberace než magnetické čočky a nejsou proto tak často využívány. Nejčastěji je najdeme v oblasti elektronového děla, protože jejich jednoduchá konstrukce je ideální pro fungování ve vakuu a jejich aberace zde nemají takový dopad jako v projekčním systému. [14]

1.3.3 Zatemňovací technika a apertury

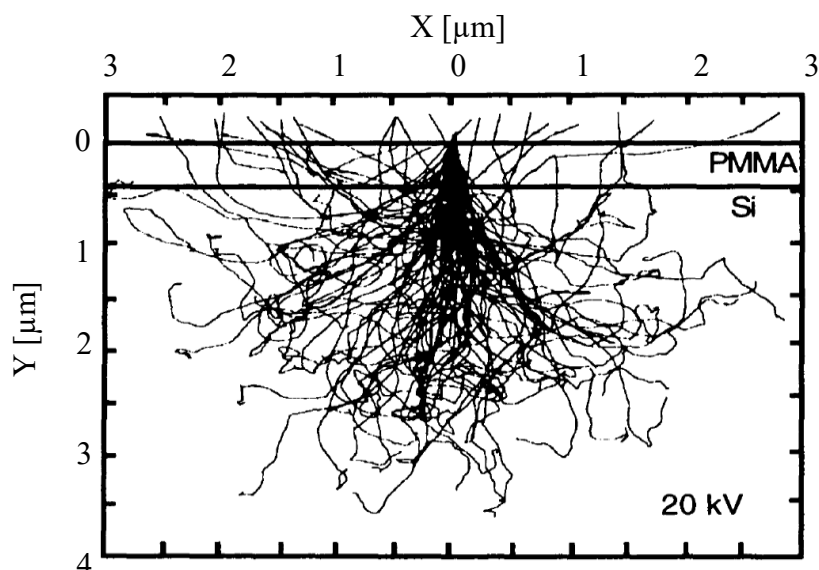
Aby nedošlo k nechtěné expozici rezistu elektronovým svazkem je zapotřebí zatemňovací technika. Obvykle spočívá ve dvou deskách sloužících jako elektrostatický deflektor napojených na zatemňovací zesilovač. Aplikováním napětí na desky dojde k vychýlení elektronů a svazek je zastaven clonou. Apertury jsou díry, kterými svazek prochází. Existují apertury zastavující svazek sloužící jako clony v zatemňovací technice a apertury určující množství prošlého svazku a definující úhel dopadu svazku vůči povrchu rezistu. Apertury tedy hrají významnou roli, jelikož ovlivňují aberace čoček a tím i výsledné rozlišení. [14]

1.3.4 Interakce elektron-pevná látka

Interakce mezi elektronovým svazkem a polymerem zajišťuje přenos energie, který probíhá prostřednictvím srážek mezi dopadajícími elektrony a atomy polymeru. Interakcemi mezi rezistem a následně i substrátem dochází k rozptylu, a tudíž i k expozici energie na větší část rezistu než je jen původní místo dopadu elektronového svazku. Tento jev je nazýván proximity efekt a jedná se o hlavní překážku při elektronové litografii vedoucí ke snížení výsledného rozlišení. [17]

Interakce mezi elektrony a pevnými látkami mohou vést k elastickým a neelastickým srážkám. Při elastické srážce dochází ke kolizi mezi dopadajícím elektronem a jádrem atomu a elektron je rozptýlen pod relativně velkým úhlem bez odevzdání energie. Při neelastické srážce dochází ke kolizi mezi dopadajícím elektronem a elektrony v obalu atomu. Při této srážce dochází k tomu, že dopadající elektron předá část své energie rezistu a tudíž k expozici. Elastické srážky mají za následek, že dochází k rozptylu elektronů do nezamýšlených míst expozice a následné depozici energie v těchto místech. [5,17]

Neelastické srážky elektronového svazku s elektrony rezistu způsobují dopředný rozptyl elektronů, jehož důsledkem dochází k postupnému rozšiřování svazku ve směru do vrstvy rezistu. Elastické srážky elektronů způsobují zpětný rozptyl elektronů. Kolize mezi elektronem a atomem pevné látky je náhodný proces, který byl modelován simulací Monte Carlo za využití polymerního rezistu PMMA a křemíkového substrátu. Na obr. 7 lze vidět, že u většiny elektronů dochází k dopřednému rozptylu a ty pak pokračují dále do křemíkového substrátu. Část se jich však odrazí zpět do polymerního rezistu. [14,17,18]



Obrázek 7 - Simulace rozptylu elektronů v rezistu PMMA na křemíkovém substrátu [18]

Rozptyl elektronů je ovlivněn energií dopadajících elektronů, hustotou materiálu substrátu a tloušťkou polymerní vrstvy. Primární elektrony s vyšší energií jsou rozptýleny pod menším úhlem a dochází tak k redukci rozšiřování svazku. Z tohoto důvodu bývají u EBL preferovány svazky s vyšší energií. Vyšší hustota substrátu má za následek více zpětně rozptýlených elektronů, a to má negativní vliv na výsledné rozlišení. S rostoucí tloušťkou vrstvy polymerního rezistu roste i plocha expozice rozptýlenými elektrony, z tohoto důvodu se preferují tenké vrstvy rezistu. [17]

Interakcemi primárních elektronů s rezistem a substrátem dochází ke vzniku sekundárních elektronů, jejichž dolet je v jednotkách nanometrů. Sekundární elektrony jsou zodpovědné za expozici většiny objemu rezistu, ale vzhledem k jejich krátkému doletu hrají zásadní roli pouze při zápisu velmi malých struktur v řádech jednotek nanometrů. [17,19]

1.3.5 Elektronový svazek

Na začátku vývoje elektronové litografie bylo běžné využívání Gaussovského elektronového svazku, který je využíván v přístrojích pracujících na principu rastrovacího skenování, kdy probíhá rastrování po celé ploše a v místech expozice dojde k odtemnění clon. Tento typ svazku má kruhový tvar. Gaussovské rozložení energie v tomto svazku zapříčiňuje, že největší hustota energie je ve středu svazku a postupně klesá směrem k jeho okrajům, což má za následek snížení rozlišení v okrajových částech výsledného obrazu. Tento problém řeší tvarování svazku, kdy se pomocí clon formuje obdélníkový tvar svazku s neklesající hustotou energie. Tento typ svazku najdeme v nových přístrojích, využívajících principu vektorového skenování, kdy dochází k přejezdu skenu pouze přes místa expozice, což zrychluje proces zápisu. [20]

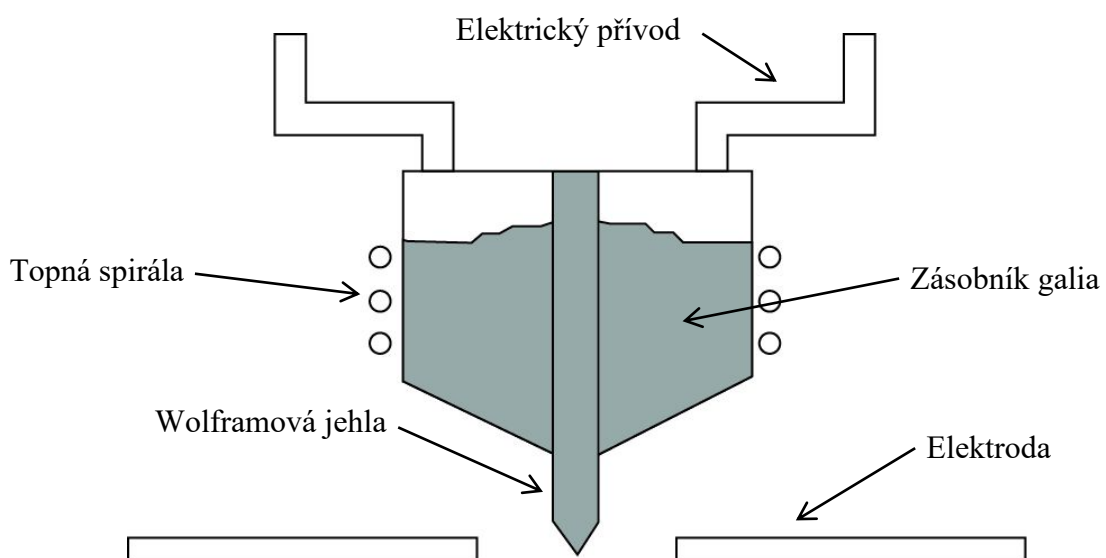
1.4 Iontová litografie

Litografickou technikou využívající jako zdroj energie nabitě částice je iontová litografie. Iontové litografie lze rozdělit na iontovou projekční litografii, která využívá zápisu přes masku. A dále na litografii zapisující fokusovaným iontovým svazkem (FIB) a litografii využívající protonového svazku (p-beam), pomocí kterých je prováděn zápis přímo bez masky. [21]

Fyzikální podstata iontů nabízí unikátní charakteristiky iontové litografie a kvůli krátké vlnové délce je eliminován vliv difrakce. Ionty putují v rovné linii a při průchodu rezistem nedochází k významnému rozptylu. Penetrace materiálu ionty umožňuje konstantní dávku expozice a její hloubka může být kontrolována změnou energie iontů, což umožňuje zápis víceúrovňových struktur v jedné vrstvě rezistu. Litografie s lehkými ionty odstraňuje problém s nežádoucí expozicí rezistu proximity efektem. [21]

1.4.1 Zdroje iontů

Typickým zdrojem iontového svazku je tekutý kov. Iontová litografie využívá iontový svazek o průměru 5 nm. Svazek vychází z wolframové jehly, nad kterou je umístěn zásobník se zdrojovým kovovým materiálem. Nejčastěji používaným kovem je galium, z důvodu jeho charakteristických vlastností jako je nízká teplota tání zabraňující reakcím s wolframovou jehlou. Nízká volná povrchová energie podporuje viskózní chování a nízká tenze par umožňuje užití galia v jeho čisté formě. Zahřáté galium smáčí wolframovou jehlu a aplikací elektrického pole na konec navlhčené špičky jehly dojde k vytvoření bodového zdroje ve tvaru Taylorova kužele, který je výsledkem rovnováhy mezi elektrostatickými silami a povrchovým napětím. Na špičce jehly dochází k ionizaci a odpařování kovu, který je kontinuálně doplňován ze zásobníku. [22] Další možností je použít místo tekutého kovu plyn, například helium. Existují také plazmové zdroje iontů a zdroje využívající vysoce ochlazených atomů. [23]



Obrázek 8 - Schéma zdroje iontového svazku využívajícího tekutého kovu [22]

1.5 Další litografické techniky

1.5.1 Nanoimprint litografie

Princip nanoimprint litografie (NIL) spočívá v otisknutí požadovaného vzoru pomocí razítka do vrstvy polymerního rezistu na substrátu. Jedním způsobem provedení tohoto procesu je za využití zvýšených teplot, kdy dochází k změknutí polymerního rezistu, což umožňuje jeho tok okolo reliéfů razítka. Po vychladnutí je razítko odtrženo. Další možnost využívá tekuté vrstvy polymerního rezistu, která je při otisknutí vystavena UV záření a dochází k zesíťování a vytvrzení polymerní vrstvy. Tato metoda vyžaduje, aby razítko nebo rezist byl z transparentního materiálu propustného pro UV záření. Hlavní výhodou NIL je jednoduchost procesu. Nevyžaduje drahou techniku a teoreticky není limitována rozlišením. Nevýhodou je potřeba fyzického kontaktu razítka s materiálem, kdy by při opakovaném použití muselo být prováděno jeho čištění. [24]

1.5.2 Laserová interferenční litografie

K expozici fotosenzitivního rezistu využívá laserová interferenční litografie (LIL) interferenčních jevů vznikajících při křížení koherentních laserových paprsků. Konstrukce laserového interferometru je v kontextu porovnání s EBL a dalšími technikami poměrně jednoduchá. Existují v zásadě dvě konstrukce přístrojů. Lloydův zrcadlový interferometr, který je vhodný pro vysoké rozlišení. Druhým je dvou paprskový interferometr typický pro expozici větších ploch. Předností LIL je jednoduchost systému a možnost tvorby komplexních struktur pomocí opakované expozice. Jelikož se úhel dopadu a vlnová délka laseru liší od konvenčních litografických technik, je obzvláště potřeba brát v potaz negativní dopad odrazu světla na substrátu. Tento problém bývá řešen pomocí aplikace antireflexních povlaků. [25]

1.5.3 Directed self-assembly

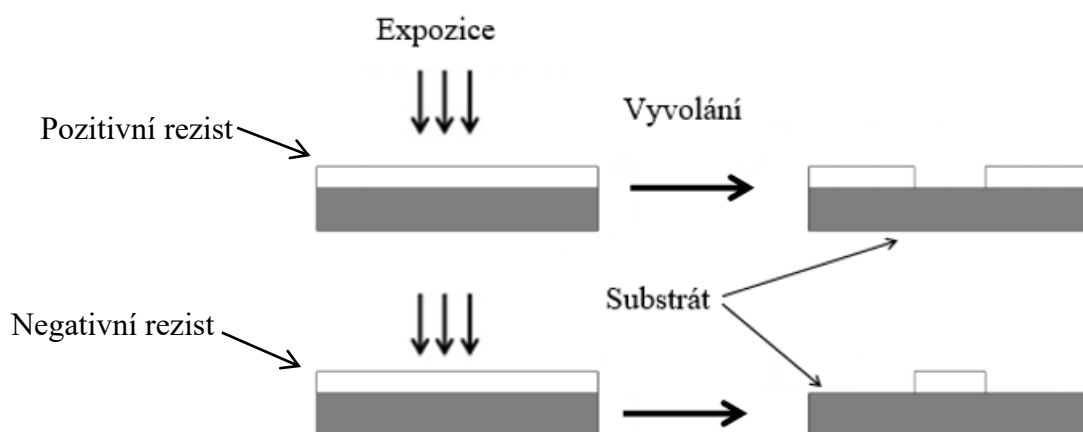
Directed self-assembly (DSA) využívá samovolného uspořádání systému v důsledku lokálních interakcí komponentů. Při DSA je směr uspořádání definován a je tak možné připravovat periodické vzory o velikostech v rozmezí desítek až jednotek nanometrů. Výhodami DSA jsou finanční nenáročnost procesu v kontextu ostatních litografických technik a přesnost vzoru v molekulárním měřítku. [26]

2 POLYMERNÍ REZISTY

Jak již bylo zmíněno v předešlých kapitolách, struktura se zapisuje do vrstvy materiálu, který nazýváme polymerní rezist. Obecně rozdělujeme rezisty na pozitivní a negativní, v závislosti na tom, jestli při expozici energií dochází k degračním anebo síťovacím procesům. Zapsaný latentní obraz tak ovlivňuje rozpustnost rezistu a tvorba struktury je dokončena pomocí procesu vyvolání za použití vhodného rozpouštědla. K nanesení polymerního rezistu na substrát se obvykle využívá metody spin coating [27,28]

2.1 Pozitivní a negativní polymerní rezist

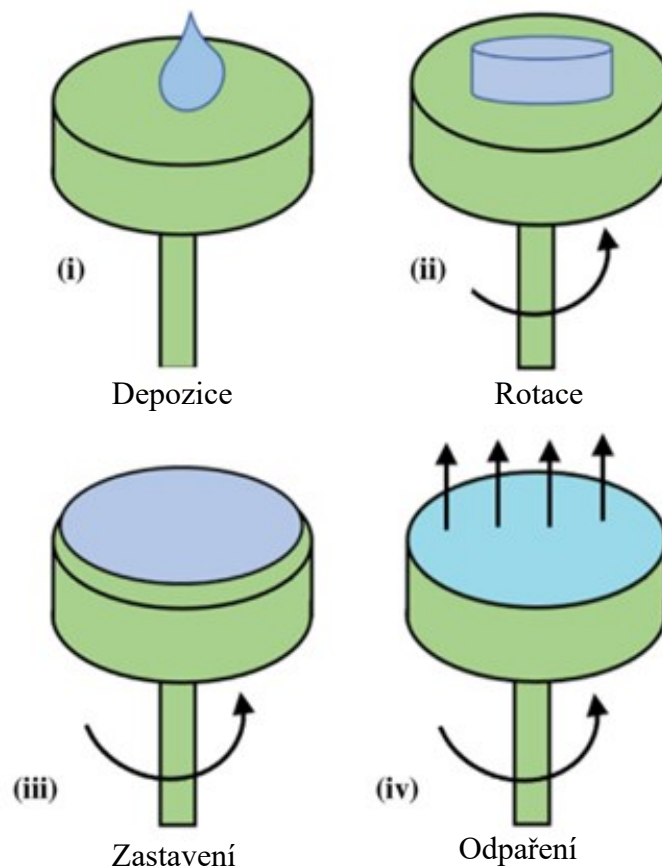
Pro pozitivní polymerní rezist je charakteristické, že neexponovaný je velmi málo rozpustný ve vývojce a jeho rozpustnost stoupá s expoziční dávkou v důsledku degračních procesů ve vazbách. Naopak rozpustnost negativního rezistu s expoziční dávkou klesá, což mají na svědomí síťovací procesy. U pozitivních rezistů tedy vyvoláním ve vývojce dochází k rozpuštění a odplavení exponovaných částí rezistu. Při vyvolání negativního rezistu jsou odplaveny neexponované části. Z tohoto důvodu je praktické využívat pozitivní rezisty v případě, že plocha určená k expozici je menší než neexponovaná plocha a naopak. [28,29]



Obrázek 9 - Schéma vyvolání rezistu (pozitivní-nahoře, negativní-dole)

2.2 Spin coating

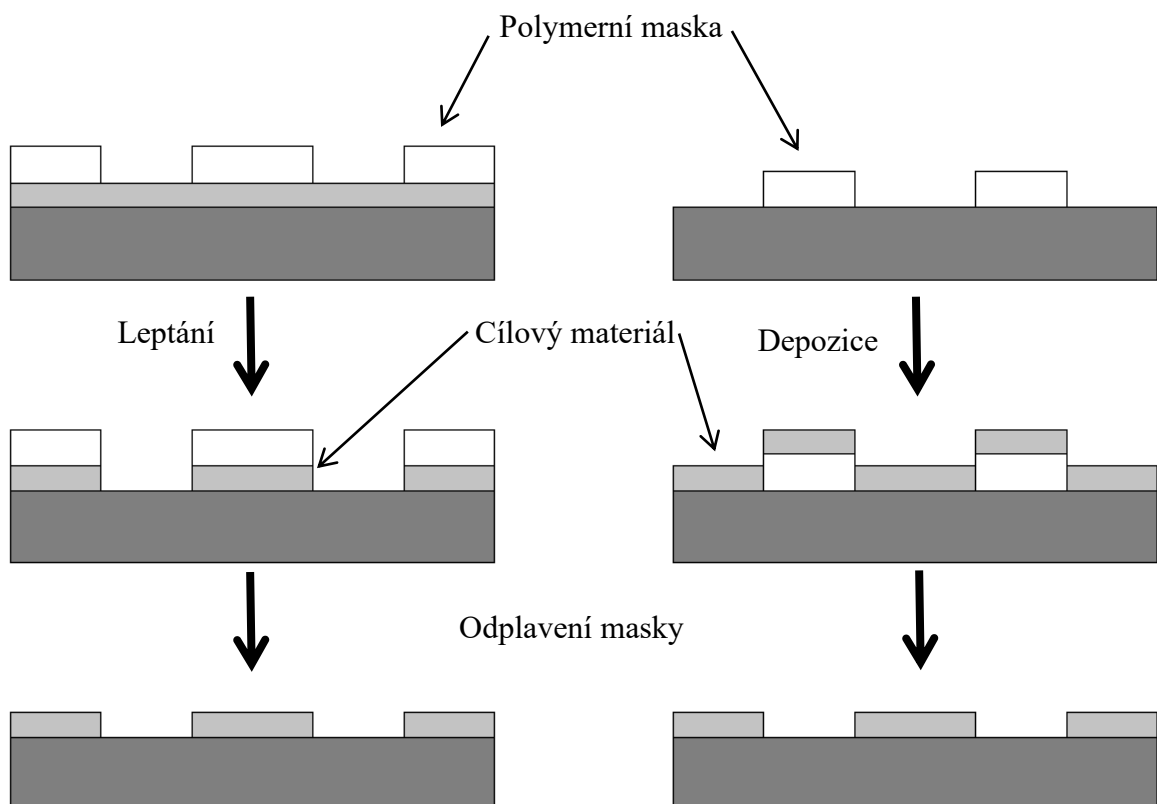
Kvalita a jednotvárnost vrstvy polymerního rezistu je jedním z esenciálních faktorů pro zvládnutí kontrolovatelného a reprodukovatelného procesu přípravy struktur pomocí litografických technik. Spin coating neboli rotační nanášení je technika přípravy rovnoměrných tenkých vrstev nebo filmů na substrátu pomocí odstředivých sil. Polymerní rezist ve formě roztoku v rozpouštědle je nanesen na substrát, s kterým je následně rotováno po určitý čas za rychlosti rotace stovek až tisíců otáček za minutu (RPM). Tyto parametry a vlastnosti roztoku jako je například viskozita určují výslednou tloušťku, kdy více RPM a menší viskozita vedou k tenčím vrstvám. V důsledku odstředivých sil během spin coatování dochází k odstředování rezistu směrem k okraji substrátu a eventuálně pryč z něj, což vede k tvorbě uniformní vrstvy připoutané adhezními silami k povrchu substrátu. [28,30]



Obrázek 10 - Spin coating [30]

3 LIFT-OFF PROCES

Pomocí litografických technik vytvořenou masku z polymerního materiálu lze dále využít k tvorbě struktur z cílového materiálu. Existují subtraktivní takzvané top-down techniky, při kterých je cílový materiál (obvykle vodivý kov) nanesený pod maskou odstraňován pomocí leptání nebo odprašování v místech, kde cílový materiál není maskou krytý. Lift-off proces zahrnuje aditivní neboli bottom-up techniky, kdy dochází k depozici cílového materiálu na polymerní masku pomocí napařování nebo napařování. Masku s naneseným materiálem je následně odplavena rozpouštědlem a výsledkem je struktura cílového materiálu přímo na substrátu. Rozdíl mezi jednotlivými metodami zobrazuje obr. 11. Rozlišení výsledné struktury je dáno kvalitou připravené polymerní masky a je tedy závislé na zvolené litografické technice. Z pohledu depozice cílového materiálu je jedinou limitací velikost zrn. Pro provedení lift-off procesu je zásadní, aby zvolené rozpouštědlo penetrovalo do polymerní vrstvy a rozpustilo ji. [31–33]



Obrázek 11 - Leptání (vlevo), lift-off proces (vpravo) [31]

3.1 Metody nanášení cílového materiálu

Způsoby depozice cílového materiálu lze rozdělit na základě jejich podstaty na chemickou depozici z plynné fáze (CVD) a fyzikální depozici z plynné fáze (PVD). Dále existují metody nanášení atomové vrstvy (ALD), epitaxe molekulárním svazkem (MBE) a další. [33,34]

3.1.1 CVD

Chemická depozice z plynné fáze je metoda nanášení vrstvy, kdy těkavá část nanášené látky chemicky reaguje s plyny, parami nebo kapalinami na substrátu za vzniku netěkavé pevné látky usazující se na substrátu. Procesy CVD obvykle probíhají za tlaků o několik torrů vyšších, než je atmosférický tlak a za relativně vysokých teplot okolo 1000 °C. Za účelem vylepšení metody a zvýšení efektivity chemické reakce za nižších teplot byly vyvinuty CVD metody probíhající za působení vnějších vlivů. Například plasmatu (PAVD), laseru (LECVD), nízkého tlaku (LPCVD) i atmosférického tlaku (APCVD). [34,35]

3.1.2 PVD

Fyzikální depozice z plynné fáze je metoda nanášení vrstvy částic cílového materiálu přímo na povrch substrátu. Obecně lze PVD rozdělit na dvě metody, a to napařování a naprašování. [34]

Napařování je proces probíhající ve vakuové komoře, kdy odpařený cílový materiál kondenzuje na povrchu substrátu. Nejčastěji jsou cílové materiály odpařeny pomocí odporově ohřívání vlákna vyrobeného ze žáruvzdorných kovů. Pro nanášení vrstev žáruvzdorných kovů, které nelze odpařit pomocí odporového ohřevu, je využito odpařování pomocí elektronového svazku. [34]

Naprašování je široce využívaná technika v kontextu depozice tenkých vrstev včetně tvorby tenké vrstvy vodivého kovu na polovodičovém substrátu. Obvykle je prováděno ve vakuové komoře pomocí plazmatu generujícího nabitě částice, které jsou elektrickým polem urychlovány směrem k povrchu cílového materiálu. Bombardování povrchu energetickými částicemi vede k erozi cílového materiálu a jeho odprašování. Depozice pomocí naprašování není tedy nic jiného než akumulace atomů takto odprašovaného materiálu na povrch vzorku. [36]

3.1.3 ALD

Nanášení atomárních vrstev je prakticky velmi specifickým podtypem CVD. Charakteristikou ALD je to, že plynné reaktanty jsou do komory vpouštěny střídavými pulzy oddělenými profukováním inertním plynem, což zabraňuje reakci plynných fází a umožňuje řízený růst cílového materiálu. Jedinečná možnost a citlivost řízení růstu vrstvy je důvodem širokého využití ALD, a to včetně ve specifických oblastech výroby mikroelektroniky, která byla hlavní tažnou silou vývoje ALD. [37]

3.1.4 MBE

Epitaxe molekulárním svazkem funguje na základě odpařování za ultra vysokého vakua. Tento proces byl v polovodičovém odvětví aplikován pro růst krystalických vrstev arsenidu galia (GaAs) a následně zdokonalen do procesu dnes známého jako MBE. V hlavní komoře dochází k vypařování zdrojových materiálů, které mezi sebou reagují až po dosažení substrátu za vzniku monokrystalu. Systém bývá opatřen pomocnou komorou umožňující charakterizaci a uložení vybavení k provedení dalších procesů. MBE je alternativou k epitaxím z kapalně fáze (LPE) a plynné fáze (VPE). [38–41]

3.2 Struktury připravované metodou lift-off

Pomocí lift-off procesu lze připravovat kovové vodivé spoje a elektrody na plochém substrátu. V určitých případech může být využití procesu lift-off výhodné, jelikož některé kovy jako jsou například platina nebo zlato nelze snadno leptat a jsou k tomu potřeba nebezpečné chemikálie. [42]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POUŽITÉ CHEMIKÁLIE, PŘÍSLUŠENSTVÍ A PŘÍSTROJE

4.1 Použité chemikálie

- PMMA ($M_w = 15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)
- PMMA ($M_w = 350\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)
- Anisol
- Aceton
- Ethanol
- Chloroform
- Isopropanol

4.2 Substráty

- Křemíkový wafer
- Polyimidová fólie

4.3 Přístroje

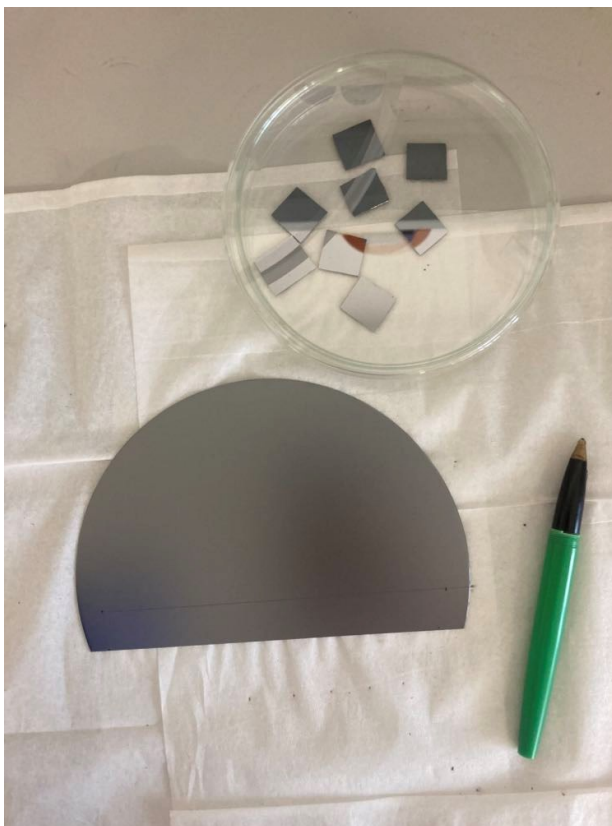
- Ultrazvuková čistička
- Spincoater Laurell
- Hotplate
- Mechanický profilometr Bruker DektakXT
- Elektronový mikroskop Tescan VEGA LMU
- Optický mikroskop Leica DVM 2500
- Naprašovačka kovů Quorum Q300 TT

5 PŘÍPRAVA VRSTEV POLYMERNÍHO REZISTU PMMA

Aby mohl být proveden zápis elektronovým svazkem bylo potřeba připravit vrstvy polymerního rezistu na substrátu. Jako polymerní rezist byl zvolen polymethylmethakrylát (PMMA) a jako substráty křemíkový wafer a polyimidová fólie. Jelikož tvorba struktur pomocí litografických technik je velmi citlivá na nečistoty, jejichž přítomnost vede k defektům, bylo při přípravě substrátů, vrstev a následné práci dbáno na čistotu. K manipulaci se vzorky používány nitrilové rukavice a pinzety.

5.1 Příprava křemíkového substrátu

Nejprve byly připraveny křemíkové substráty. Z křemíkového waferu byly diamantovým nožem nařezány čtverce o velikosti strany 1,5 cm, které byly pinzetou umístěny do kádinky s acetonem a pomocí ultrazvuku čištěny po dobu 10 minut. Následně byly přemístěny do kádinky s ethanolem a opět ultrazvukem čištěny po 10 minut. Takto ošetřené vzorky byly otřeny bezprašnými bezchloupkovými ubrousky a ponechány na vzduchu k vysušení.



Obrázek 12 - Řezání křemíkového substrátu

5.2 Příprava substrátu z polyimidové folie

Jako další typ substrátu byly nůžkami nastříhány čtverce o velikosti strany 1,5 cm z polyimidové fólie, které byly po dobu 10 minut ultrazvukem čištěny v kádince s ethanolem. Následně byly otřeny bezprašnými bezchloupkovými ubrousky a umístěny na mikroskopické sklíčko, aby byla usnadněna další manipulace a bylo zabráněno ohýbání fólie.

5.3 Příprava polymerního roztoku PMMA

Byly připraveny dva 10 g polymerní roztoky o 10 %hm. PMMA v anisolu, kdy pro první roztok byl použit PMMA o molární hmotnosti $350\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ a pro druhý roztok PMMA o molární hmotnosti $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Na analytických vahách byl nejprve navážen 1 g práškového PMMA, který byl doplněn 9 g tekutého anisolu. Do lahvíček s roztoky byla vložena magnetická míchadla, zátky byly opatřeny parafilmovou páskou a roztok byl ponechán k promíchání na magnetické míchačce do rozpuštění PMMA.

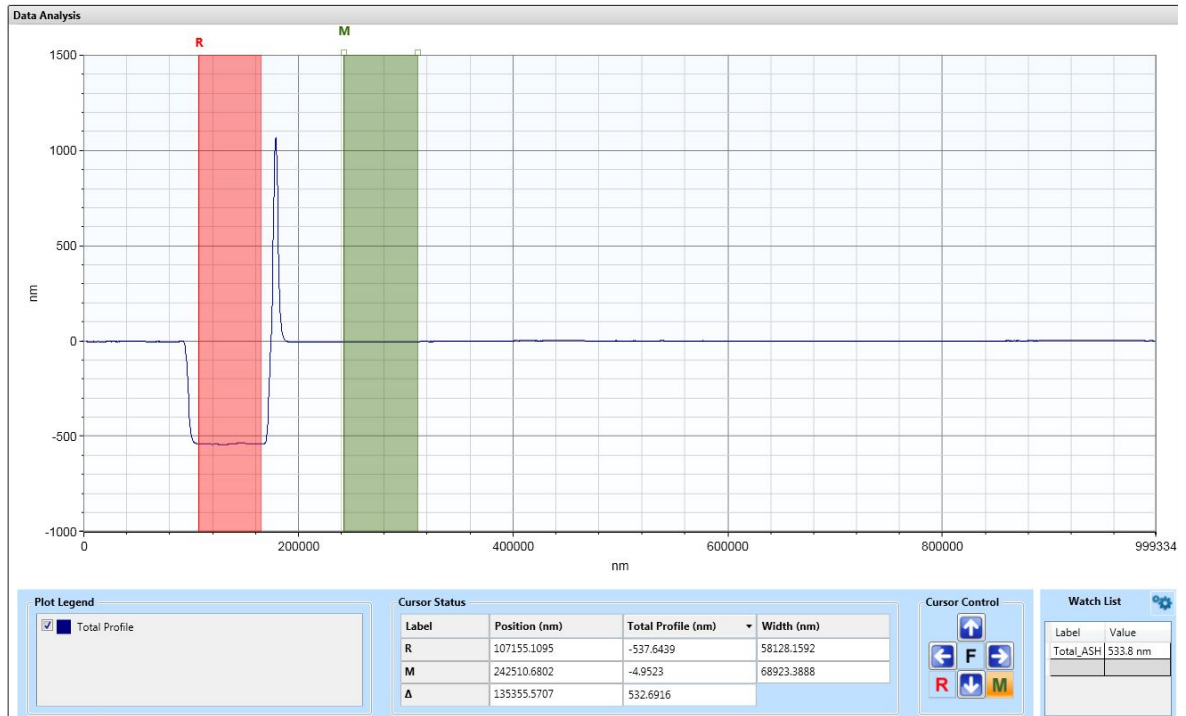
Dále byly stejným způsobem připraveny polymerní roztoky o 20 %hm a 30 %hm. PMMA v anisolu z práškového PMMA o molární hmotnosti $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$, jelikož při dalších krocích bylo zjištěno, že roztok o 10 %hm. $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA v anisolu není vyhovující pro další použití za účelem srovnání s roztokem připraveným z 10 %hm. $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA, protože vrstvy z nich připravené dosahují odlišných tloušťek (viz obr. 14).

5.4 Nanesení vrstvy polymerního rezistu PMMA na substrát

Polymerní roztok PMMA byl pomocí injekční stříkačky přes filtr nakapán na substrát a metodou spin coating byly vytvořeny rovnoměrné vrstvy polymerního rezistu na substrátu za konstantních podmínek, kdy akcelerace činila 1000 RPM a celkový čas odstředění 30 s. Byla připravena série vrstev pro každý polymerní roztok při 1000 až 8000 RPM. Takto připravené vzorky byly následně na 120 s umístěny na hotplate, aby došlo k odpaření rozpouštědla – anisolu. Pro vrstvy na křemíkovém substrátu byla použita teplota $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro vrstvy na polyamidové folii teplota $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.5 Měření tloušťky vrstvy polymerního rezistu

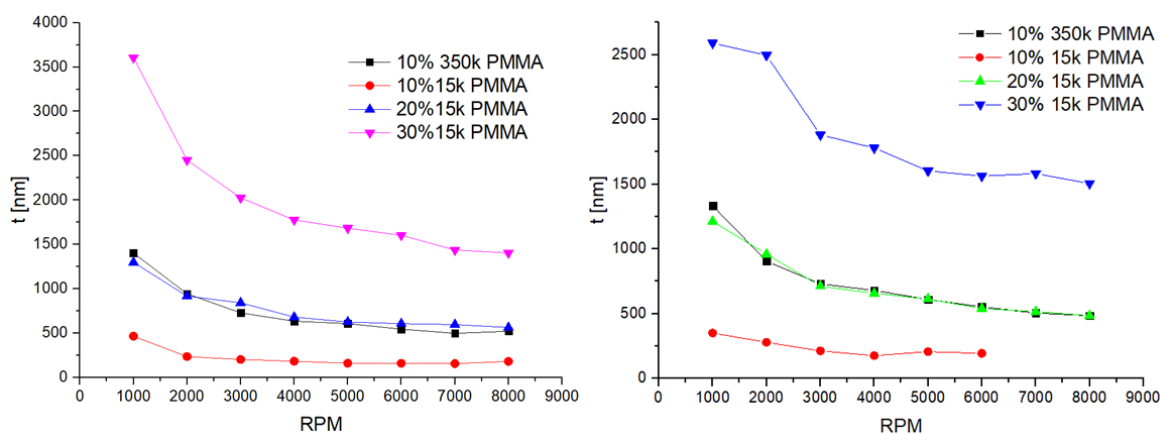
Dále byly změřeny tloušťky polymerní vrstvy. Nejprve byla pinzetou udělána rýha v polymerní vrstvě až na substrát a následně mechanickým profilometrem Bruker DekatXT změřen rozdíl výšek, respektive tloušťka vrstvy polymerního rezistu PMMA.



Obrázek 13 - Měření tloušťky vrstvy PMMA na křemíkovém substrátu mechanickým profilometrem

Na obr. 13 můžeme vidět červenou plochou označeno místo vrypu a tedy profil křemíkového substrátu a zelenou plochou označenou část profilu polymerní vrstvy. Rozdíl výšky mezi těmito plochami je odečten jako tloušťka polymerní vrstvy. Za červenou plochou lze vidět výrazný peak. Jedná se o polymerní rezist vytlačený při provedení vrypu.

Z naměřených dat byly sestrojeny grafy závislosti tloušťky polymerního rezistu na hodnotě RPM.



Obrázek 14 - závislost tloušťky vrstvy polymerního rezistu PMMA na substrátu na RPM pro 10 %hm 350k PMMA v anisolu a pro 10 %hm, 20 %hm a 30 %hm 15k PMMA v anisolu (křemíkový substrát – vlevo, polyimidová fólie – vpravo)

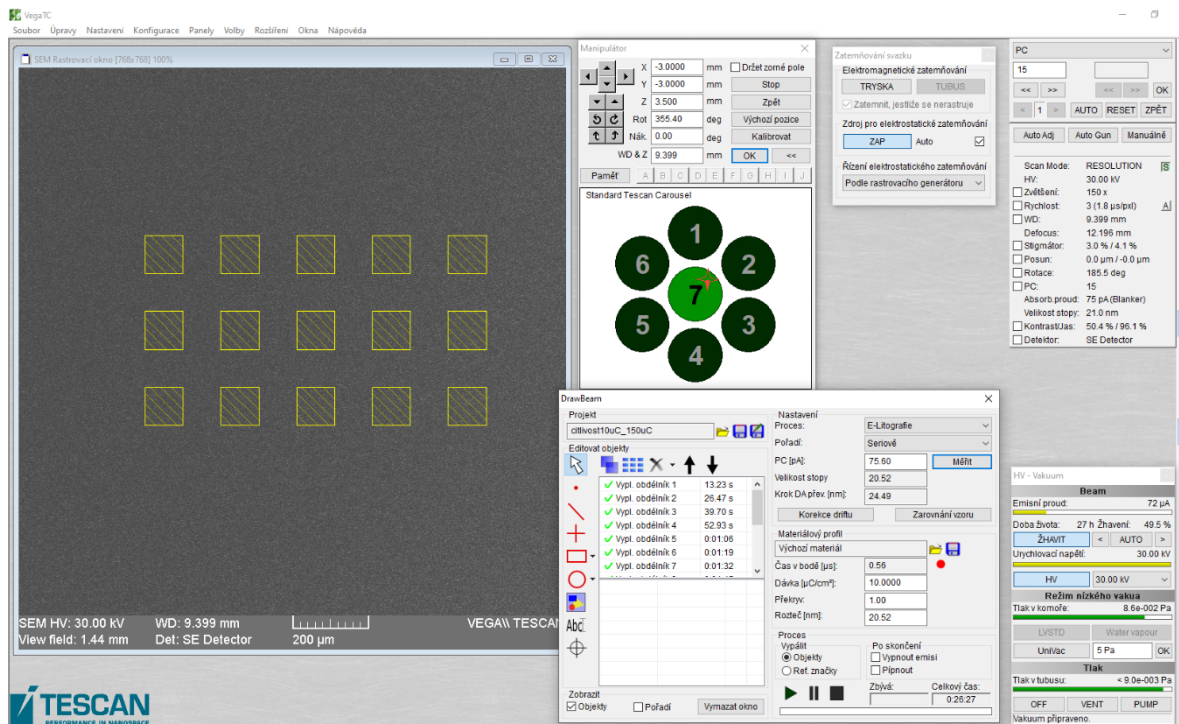
Na obr. 14 můžeme vidět grafy závislosti tloušťky vrstvy polymerního rezistu na křemíkovém substrátu a na polyimidové fólii, připravených metodou spin coating na počtu otáček za minutu. Lze vidět, že tloušťka vrstvy exponenciálně klesá s vzrůstajícím RPM. Pro provedení citlivostních testů byly vybrány vrstvy PMMA spin coatované při 6000 RPM, a to pro polymerní rezist připravený z 10 %hm. 350 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ práškového PMMA v anisolu a z 20 %hm. PMMA 15 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA v anisolu.

Vrstvy připravené z těchto roztoků byly zvoleny, protože se jejich křivky závislosti tloušťky vrstvy na RPM kryjí. Tloušťky vrstev připravené z obou roztoků se tedy shodují při stejném nastavení RPM. Díky tomu bude možné sledovat rozdíly v citlivostních křivkách a připravených strukturách při zápisu do rezistu PMMA s vysokou a nízkou molární hmotností.

6 CITLIVOSTNÍ TESTY

Aby byla zjištěna dostatečná dávka svazku pro zápis struktur do konkrétních tlouštěk polymerního rezistu, byly provedeny citlivostní testy na zvolených vrstvách (6.5). Provedený citlivostní test se skládal z 15 čtverců se stranou o délce 100 μm . Jeden přeběh přes čtverec odpovídal dávce 10 $\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ a bylo provedeno postupně 1 až 15 přeběhů. Výsledkem tedy jsou čtverce s postupnou dávkou 10 a 150 $\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$.

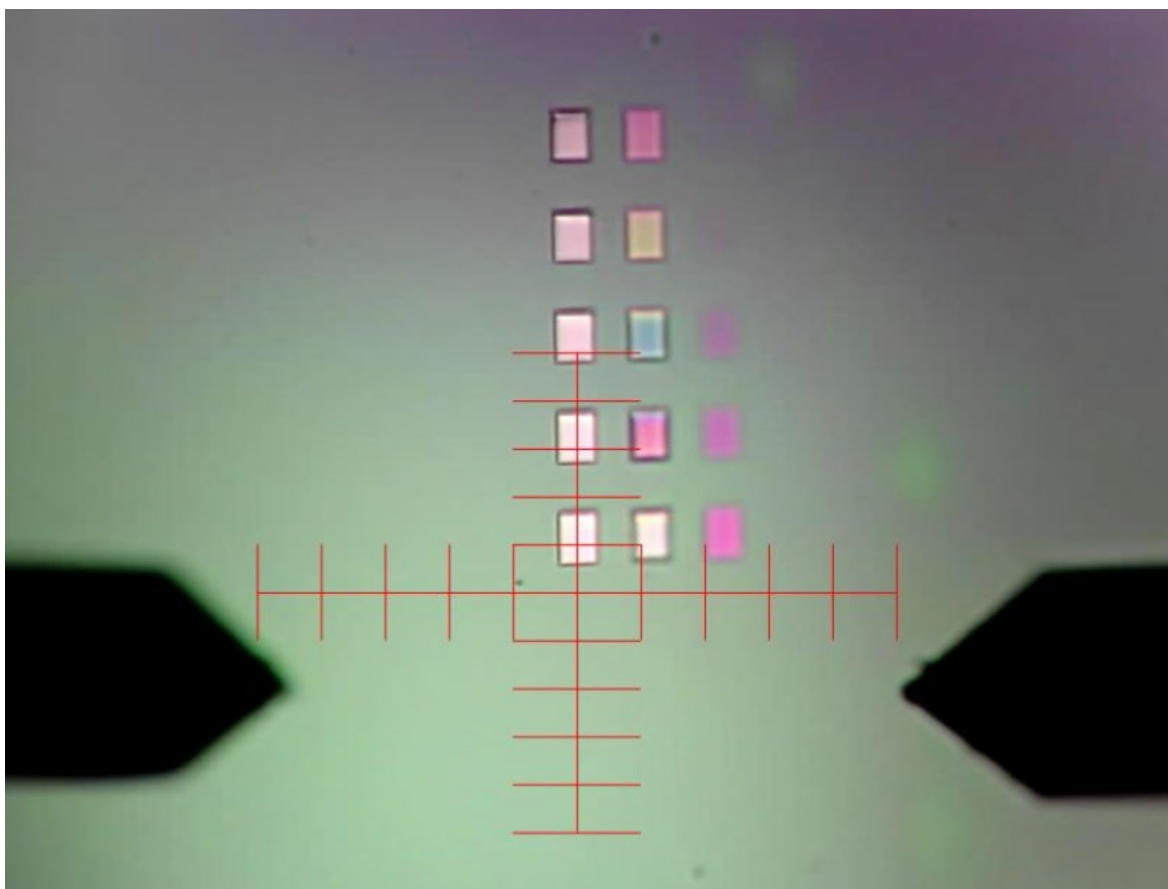
Pro samotné provedení testu byly vzorky s připravenými vrstvami oboustrannou páskou přilepeny na stojánek a vloženy do elektronového mikroskopu Tescan VEGA LMU upraveného pro zápis elektronovým svazkem. Z komory byl odčerpán vzduch, spuštěno žhavení svazku, zaostřeno na vzorek, změřen proud ve svazku a po nastavení parametrů citlivostního testu proveden zápis elektronovým svazkem.



Obrázek 15 - Schéma citlivostního testu a nastavení parametrů v programu VegaTC

Zapsané struktury citlivostních testů byly vyvolány pomocí pentylacetátu odstředěním na spin coateru při 3000 RPM po dobu 120 s.

Dále byly struktury pozorovány optickým mikroskopem. Mechanickým profilometrem byl změřen úbytek tloušťky polymerního rezistu v závislosti na dávce elektronového svazku.



Obrázek 16 - Pohled na zapsané struktury citlivostního testu při měření mechanickým profilometrem (PMMA na křemíkovém substrátu)

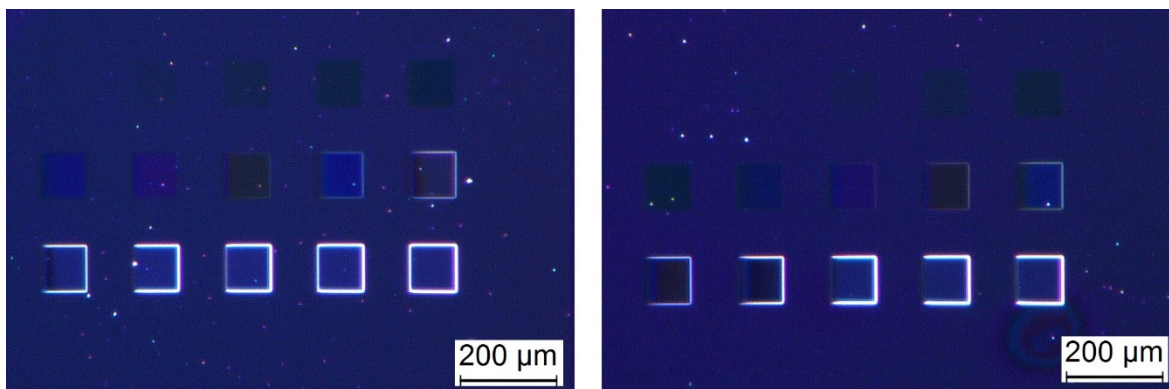
Na obr. 16 lze vidět, kdy došlo k úplnému vyvolání struktur až na substrát (bílé čtverce).

6.1 Citlivostní testy na křemíkovém substrátu

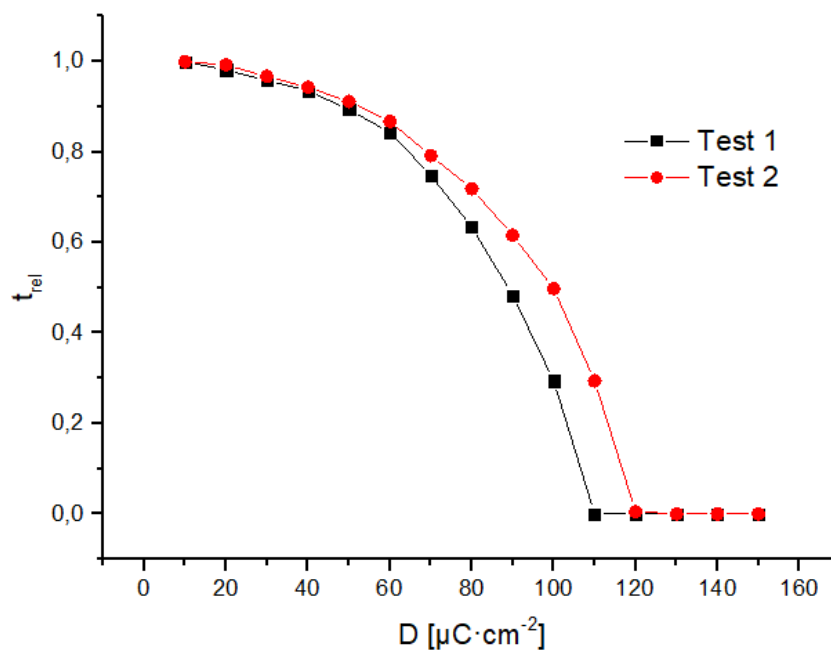
6.1.1 Polymerní vrstva z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM

Tabulka 1 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis citlivostního testu do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu

	Test 1	Test 2
Proud ve svazku [pA]	76,19	295,97
Velikost stopy [nm]	21	41



Obrázek 17 - Citlivostní testy pro vrstvu z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (velikost stopy 21 nm-vlevo, 41 nm-vpravo)



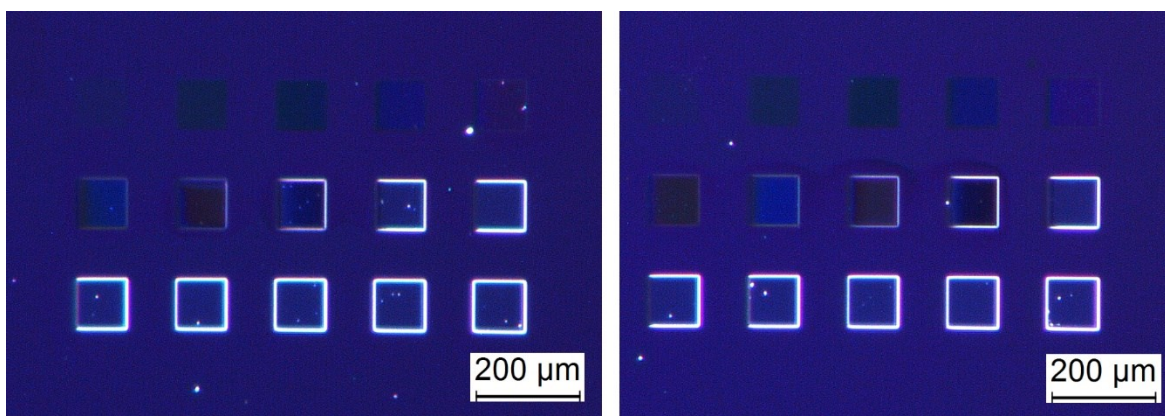
Obrázek 18 - Úbytek tloušťky vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu v závislosti na velikosti stopy

Na základě hodnot naměřených mechanickým profilometrem byla pro přípravu struktur následným lift-off procesem pro vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu zvolena hodnota dávky 120 μC·cm⁻², jelikož se jedná o první nejnižší hodnotu, kdy dojde k vyvolání až na substrát.

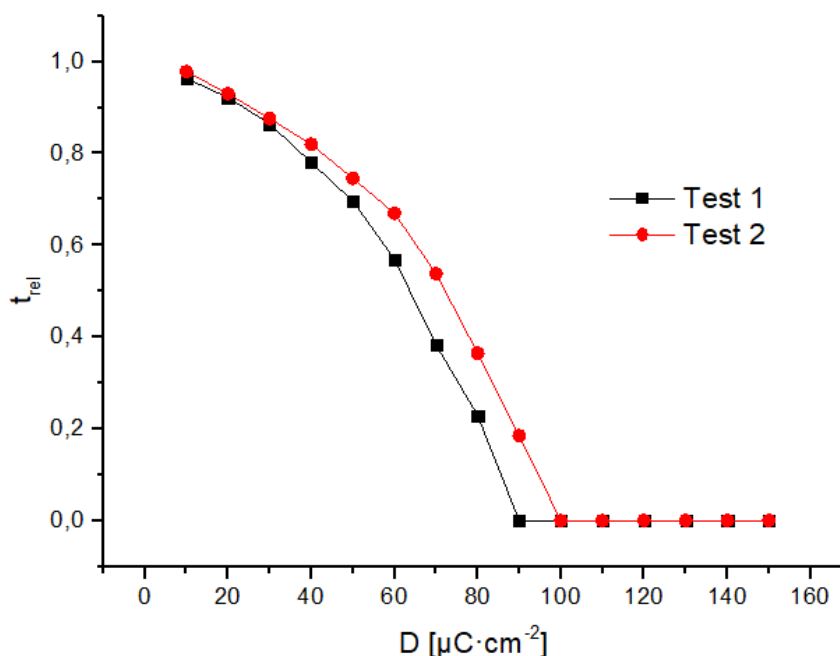
6.1.2 Polymerní vrstva z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM

Tabulka 2 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo, struktura B – vpravo)

	Test 1	Test 2
Proud ve svazku [pA]	75,60	295,97
Velikost stopy [nm]	21	41



Obrázek 19 - Citlivostní testy pro vrstvu z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (velikost stopy 21 nm-vlevo, 41 nm-vpravo)



Obrázek 20 - Úbytek tloušťky vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu v závislosti na velikosti stopy

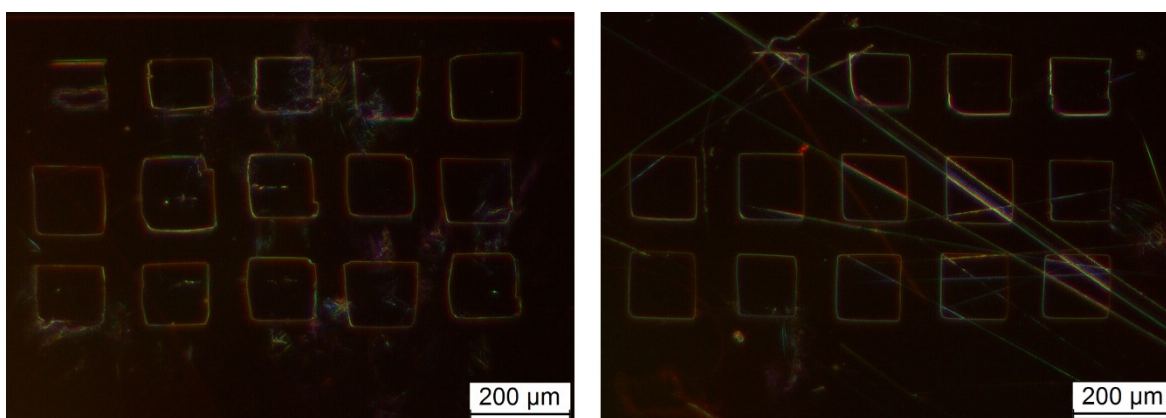
Pro přípravu struktur následným lift-off procesem pro vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu zvolena hodnota dávky 100 μC·cm⁻².

6.2 Citlivostní testy na polyamidové fólii

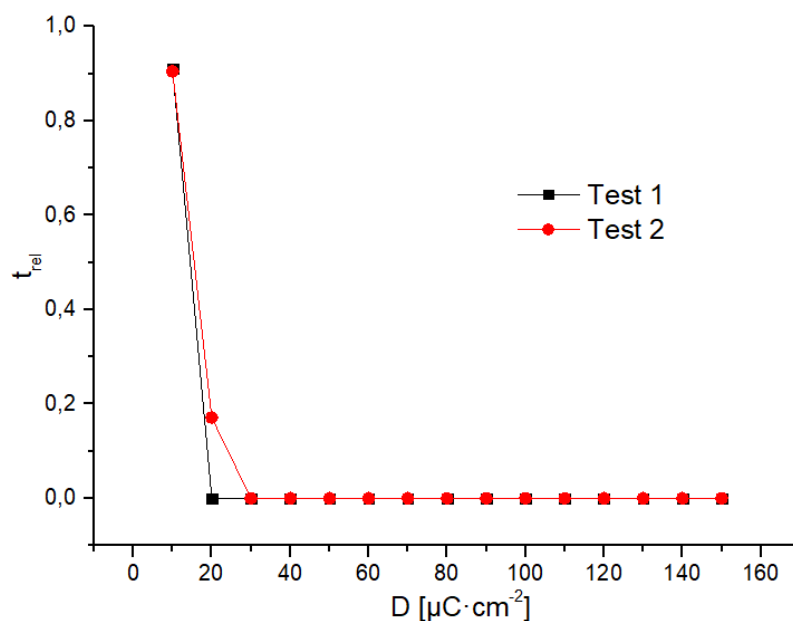
6.2.1 Polymerní vrstva z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM

Tabulka 3 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis citlivostního testu do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové fólii

	Test 1	Test 2
Proud ve svazku [pA]	47,47	79,71
Velikost stopy [nm]	27	51



Obrázek 21 - Citlivostní testy pro vrstvu z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové (velikost stopy 27 nm-vlevo, 51 nm-vpravo)



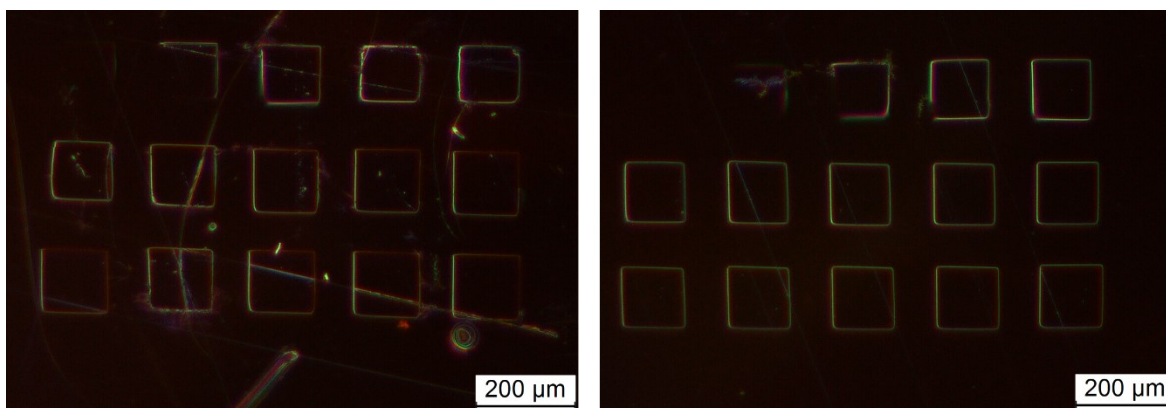
Obrázek 22 - Úbytek tloušťky vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové v závislosti na velikosti stopy

Pro zápis dalších struktur byla zvolena hodnota dávky 30 μC·cm⁻².

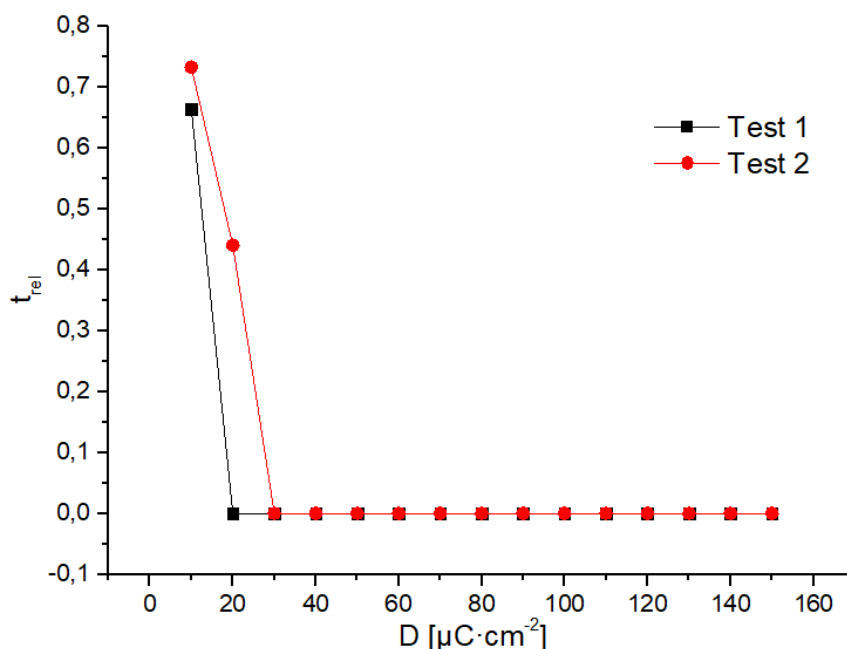
6.2.2 Polymerní vrstva z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM

Tabulka 4 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis citlivostního testu do vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové fólii

	Test 1	Test 2
Proud ve svazku [pA]	56,58	280,73
Velikost stopy [nm]	21	51



Obrázek 23 - Citlivostní testy pro vrstvu z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové (velikost stopy 2 nm-vlevo, 51 nm-vpravo)

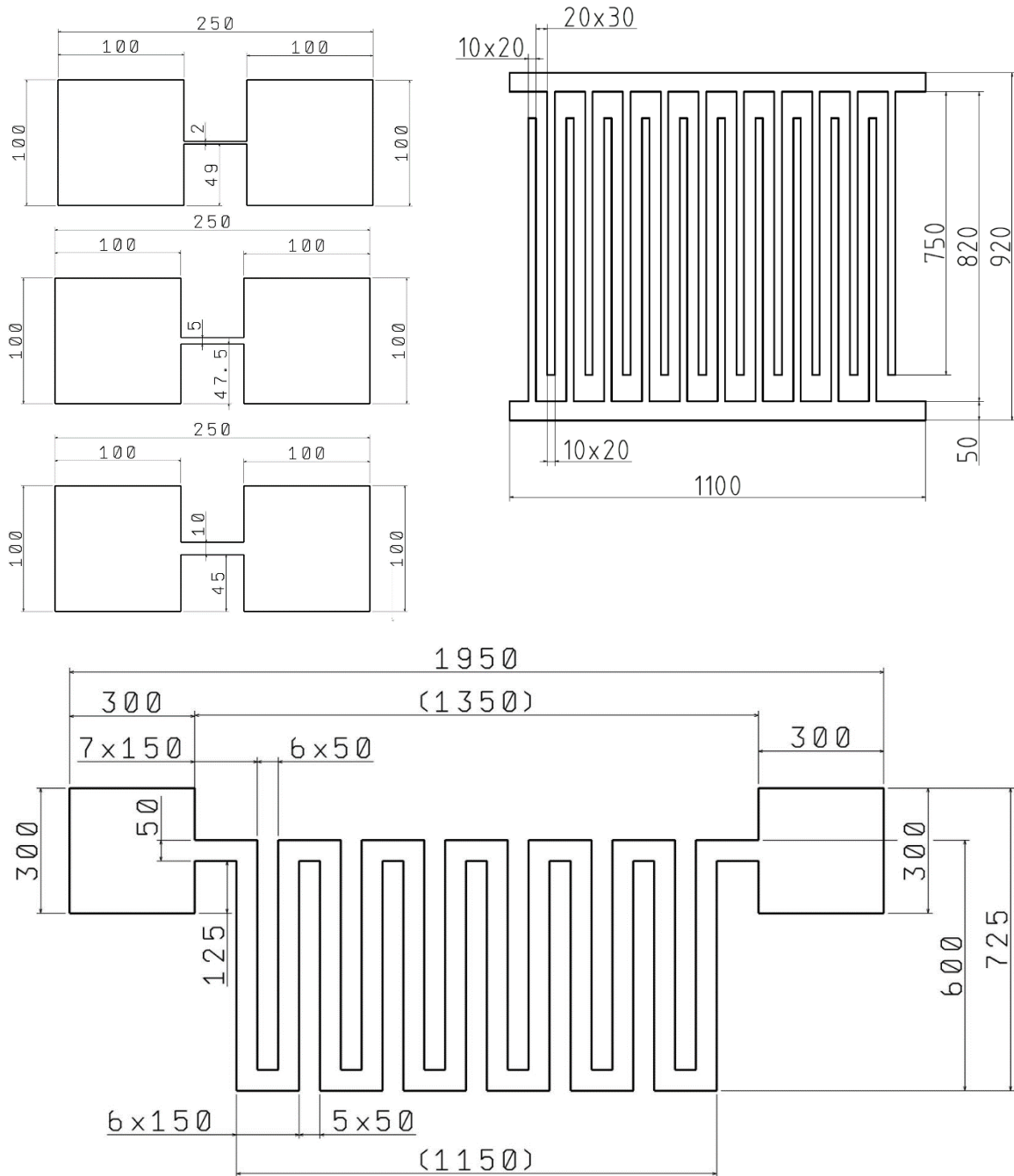


Obrázek 24 - Úbytek tloušťky vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové v závislosti na velikosti stopy

Pro zápis dalších struktur byla zvolena hodnota dávky 30 μC·cm⁻².

7 ZÁPIS STRUKTUR A LIFT-OFF PROCES

Po provedení citlivostních testů a zjištění potřebných parametrů k provedení elektronové litografie následovala tvorba samotných struktur. V programu DrawBeam byly navrženy 3 typy struktur k zapsání a přípravě pomocí lift-off (viz obr. 25). Zapsané struktury byly vyvolány stejným postupem jako při vyvolání citlivostních testů.



Obrázek 25 - Schéma zapisovaných struktur s rozměry v mikrometrech (struktury A – vlevo nahoře, struktura B – vpravo nahoře, struktura C – dole)

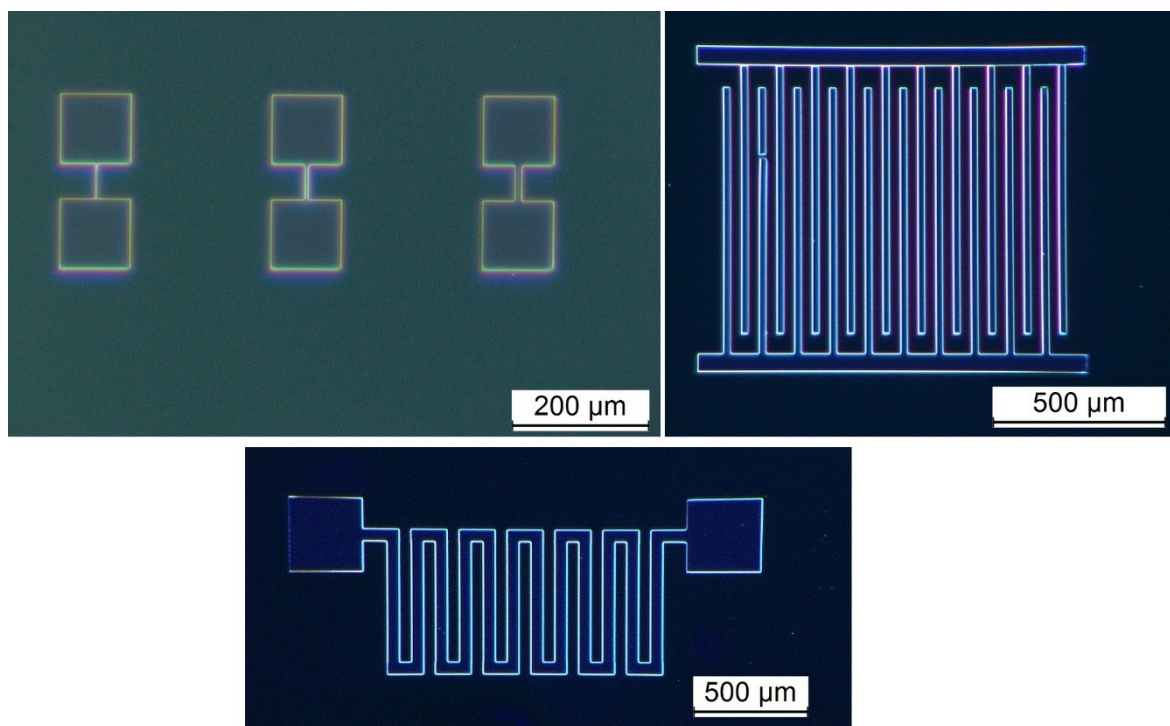
7.1 Zápis na křemík

7.1.1 Zápis do polymerní vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM

Do vrstvy z polymerního rezistu připraveného z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA spin coatované při 6000 RPM na křemíkovém substrátu byly zapsány struktury A, B i C. Pro tento zápis byla nakonec zvolena dávka 150 $\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$, jelikož dávka stanovená pomocí citlivostních testů se ukázala jako nedostatečná.

Tabulka 5 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis struktur do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu

Typ struktury [-]	A	B	C
Proud ve svazku [pA]	189,30	183,44	304,18
Velikost stopy [nm]	32	32	41



Obrázek 26 - Struktury do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo nahoře, struktura B – vpravo nahoře, struktura C – dole)

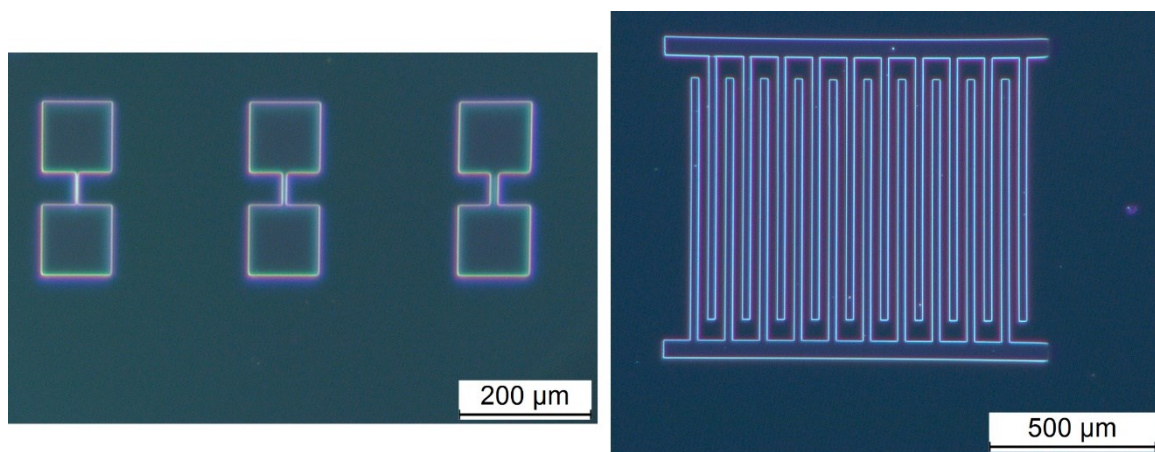
Na struktuře typu B je na třetí lince zleva vidět defekt. Tato nespojitost mohla být způsobena nestabilitou svazku anebo přítomností nečistoty na polymerní vrstvě při zápisu.

7.1.2 Zápis do polymerní vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM

Do vrstvy z polymerního rezistu připraveného z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA spin coatované při 6000 RPM na křemíkovém substrátu byly zapsány struktury A a B. Byla použita dávka 100 μC·cm⁻² stanovená pomocí citlivostního testu.

Tabulka 6 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis struktur do vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu

Typ struktury [-]	A	B
Proud ve svazku [pA]	302,42	301,25
Velikost stopy [nm]	39	39



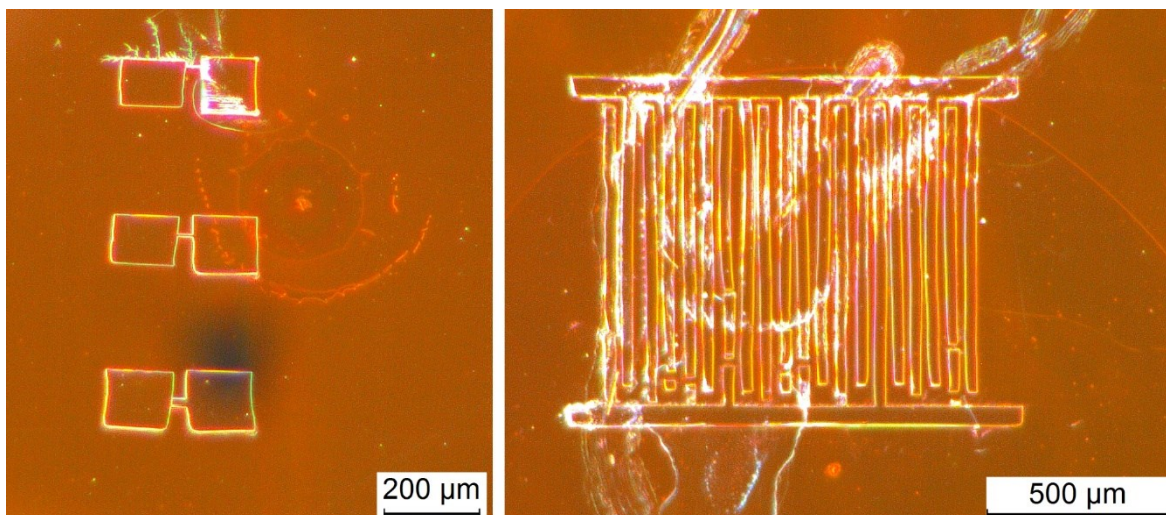
Obrázek 27 - Struktury do vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo, struktura B – vpravo)

7.2 Zápis na polyimidovou fólii

Do vrstvy z polymerního, rezistu připraveného z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA spin coatované při 6000 RPM na polyimidové fólii, byly zapsány struktury A a B. Byla použita dávka 30 μC·cm⁻² stanovená pomocí citlivostního testu.

Tabulka 7 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis struktur do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové fólii

Typ struktury [-]	A	B
Proud ve svazku [pA]	72,67	61,54
Velikost stopy [nm]	40	40



Obrázek 28 - Struktury do vrstvy z 10 %hm. $350\ 000\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA 6000 RPM na polyimidové fólii (struktury A – vlevo, struktura B – vpravo)

Na zapsaných strukturách lze pozorovat defekty, kdy dochází k pokřivení obrysu struktur. To může být způsobeno nabíjením fólie, zahříváním anebo pokřivením fólie.

Při pokusu o odstranění defektů byl proveden zápis na nový vzorek, který byl oboustrannou páskou fixován k mikroskopickému sklíčku, aby nedocházelo k možnému pokřivení fólie a bylo provedeno pokovení rezistu tenkou vrstvou Ag pro odvod náboje. Při pokusu o zápis byl však pozorován nestálý proud na detektoru. Pravděpodobně z důvodu nabíjení fólie, protože použití substrátů s menší vodivostí může vést k defektům spojených s nabíjením vzorku. [43]

7.3 Lift-off

Následně byl proveden samotný lift-off proces, kdy na substrát s polymerní maskou (struktura připravená pomocí elektronové litografie) byla pomocí naprašovačky nanášena vrstva Ag. Vzorek byl následně vložen do kádinky s chloroformem a pomocí ultrazvuku bylo provedeno odplavení masky společně se stříbrnou vrstvou na ní. Výsledkem byla zapsaná struktura z Ag přímo na křemíkovém substrátu. Takto připravená struktura byla v ultrazvukové čističce očištěna pomocí acetonu.

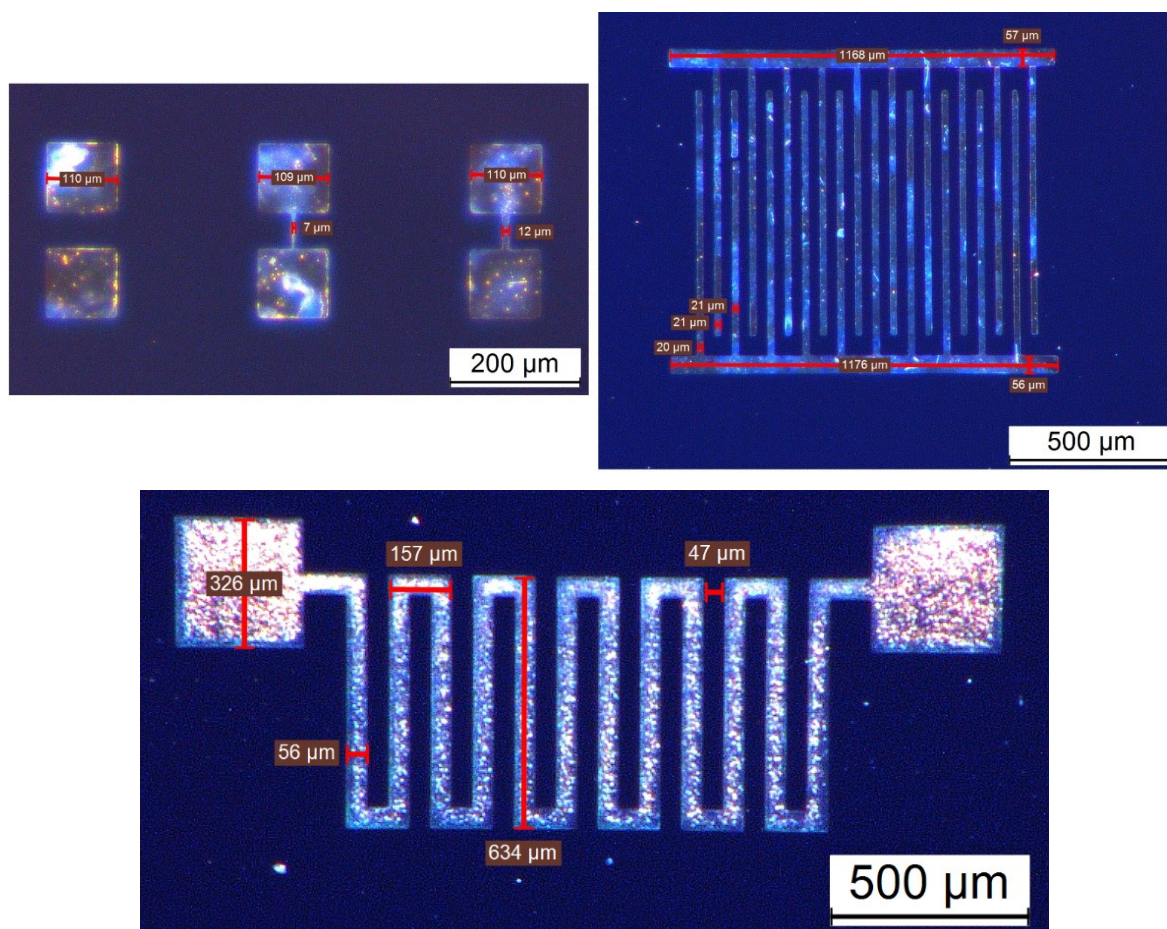
8 CHARAKTERIZACE PŘIPRAVENÝCH STRUKTUR

Připravené struktury byly charakterizovány pomocí optické mikroskopie, mechanické profilometrie a SEM. Byla pozorována kvalita připravených struktur a přítomnost případných nečistot či defektů, zkontrolováno dostatečné odplavení masky z polymerního rezistu a změřeny vybrané rozměry struktur.

8.1 Optická mikroskopie

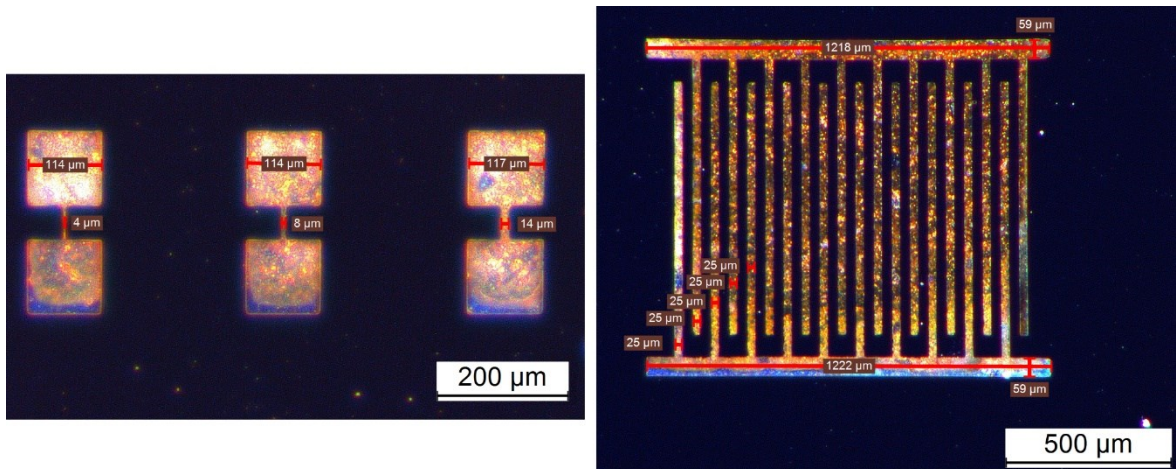
Jako první analýza připravených struktur byla zvolena optická mikroskopie, pomocí které bylo sledováno, zda došlo k dostatečnému odplavení polymerní masky s materiálem při procesu lift-off a zda byly vzorky dobře očištěny acetonem. Následně byly pro prvotní představu změřeny vybrané rozměry struktur.

8.1.1 Ag struktury naprášené přes masku z polymerní vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM



Obrázek 29 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemikovém substrátu (struktury A – vlevo nahoře, struktura B – vpravo nahoře, struktura C – dole)

8.1.2 Ag struktury naprášené přes masku z polymerní vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM

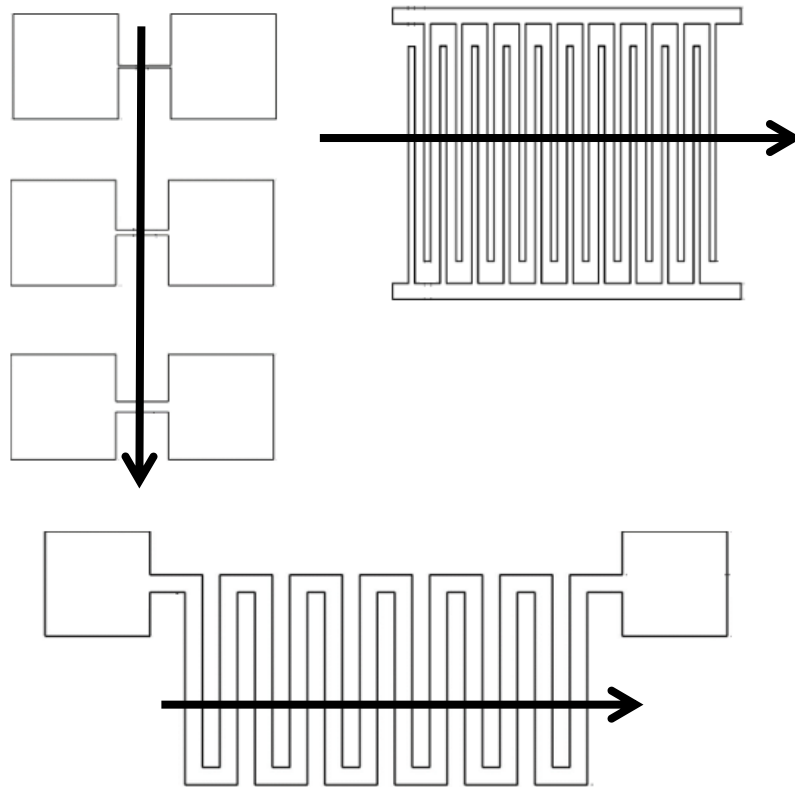


Obrázek 30 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo, struktura B – vpravo)

Ze snímků lze vidět, že struktury vytvořené pomocí polymerní masky z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA nabývají větších rozměrů než u struktury vytvořené pomocí polymerní masky z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA. Na obr. 29 můžeme pozorovat, že u struktury typu A nedošlo k depozici Ag na substrát v oblasti nejtenčí linky o navržené šířce 2 μm, přestože na obr. 26 je vidět, že v daném místě došlo k expozici a k rozpuštění polymerního rezistu v této části polymerní masky. Dávka energie zřejmě nebyla dostatečná, aby došlo k vyvolání až na substrát a musela by být pro takto malé rozměry zvýšena, protože zapisování menších struktur vyžaduje kompenzaci dávky. [14]

8.2 Mechanická profilometrie

Mechanickou profilometrií byly změřeny šířky vodivých linek na jednotlivých strukturách. Schéma přejezdu hrotu profilometru přes jednotlivé linky je zobrazeno na obr. 31.



Obrázek 31 - Schéma přejezdu hrotu mechanického profilometru přes jednotlivé struktury

8.2.1 Struktury typu A

Tabulka 8 - Porovnání naměřených rozměrů mechanickým profilometrem s navrženými rozměry pro struktury typu A

Navržený rozměr [μm]	Maska z 10 %hm. 350 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA [μm]	Maska z 20 %hm. 15 000 $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA [μm]
2	0	8,411
5	6,464	11,822
10	12,422	14,355

8.2.2 Struktury typu B

Tabulka 9 - Porovnání naměřených rozměrů mechanickým profilometrem s navrženými rozměry pro struktury typu B

Pořadí vodivé linky [-]	Maska z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA [μm]	Maska z 20 %hm. 15 000 g·mol ⁻¹ PMMA [μm]
1	18,389	25,551
2	18,868	25,059
3	19,397	24,354
4	19,295	25,878
5	18,959	24,999
6	18,795	24,706
7	19,247	25,585
8	19,445	24,414
9	19,541	24,825
10	19,591	27,193
11	19,487	26,022
12	19,533	25,731
13	18,451	24,266
14	18,753	24,366
15	18,819	24,425
16	18,621	25,107
17	19,111	24,783
18	18,997	24,967
19	18,374	24,122
20	18,932	23,888
Průměr [μm]	19,03 ± 0,09	25,01 ± 0,18
Navržený rozměr [μm]	20	20

8.2.3 Struktury typu C

Tabulka 10 - Porovnání naměřených rozměrů mechanickým profilometrem s navrženými rozměry pro struktury typu C

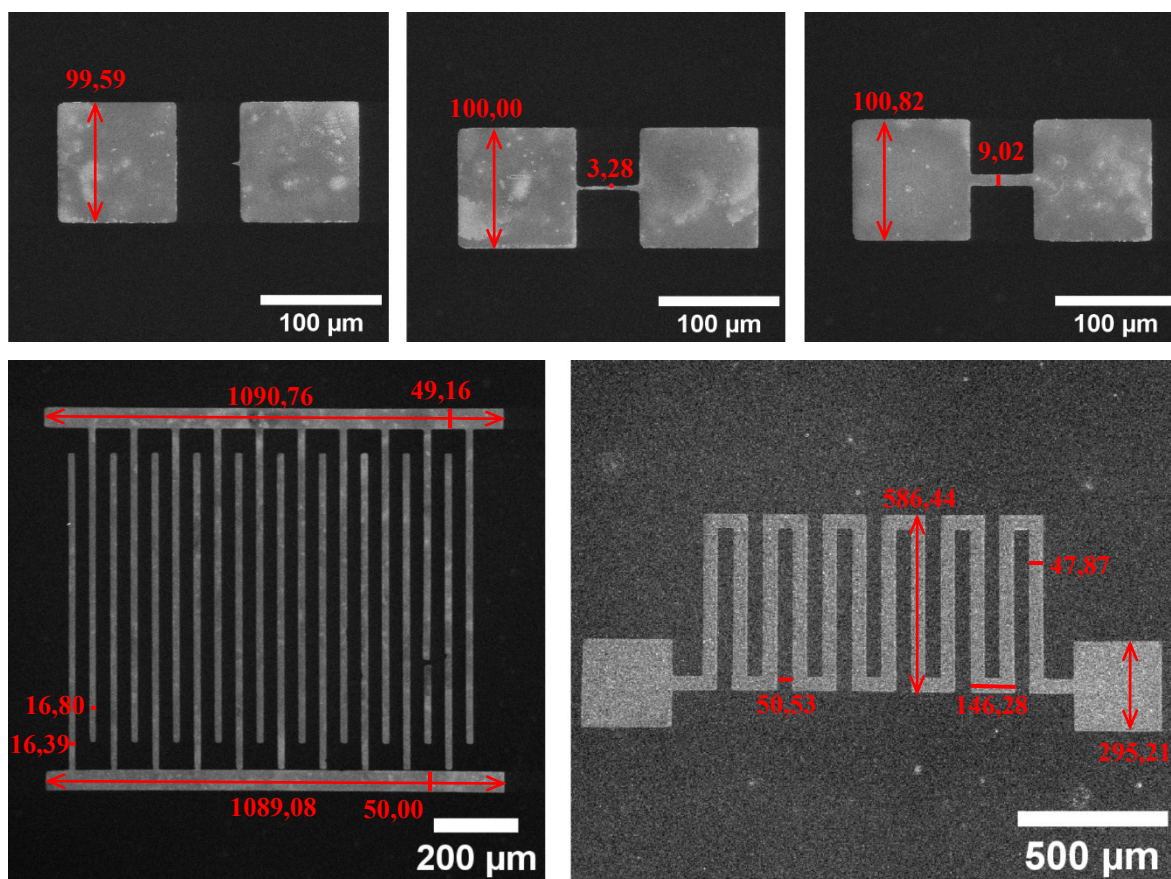
Pořadí vodivé linky [-]	Maska z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA [μm]
1	50,951
2	50,282
3	50,096
4	50,819
5	50,103
6	49,387
7	51,162
8	51,073
9	50,896
10	51,237
11	49,977
12	49,169
Průměr [μm]	50,4 ± 0,2
Navržený rozměr [μm]	50

Z naměřených šířek vodivých linek uvedených v tab. 8, tab. 9 a tab. 10 lze vidět, že struktury vytvořené za použití polymerní masky z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA dosahují menších rozměrů.

8.3 SEM

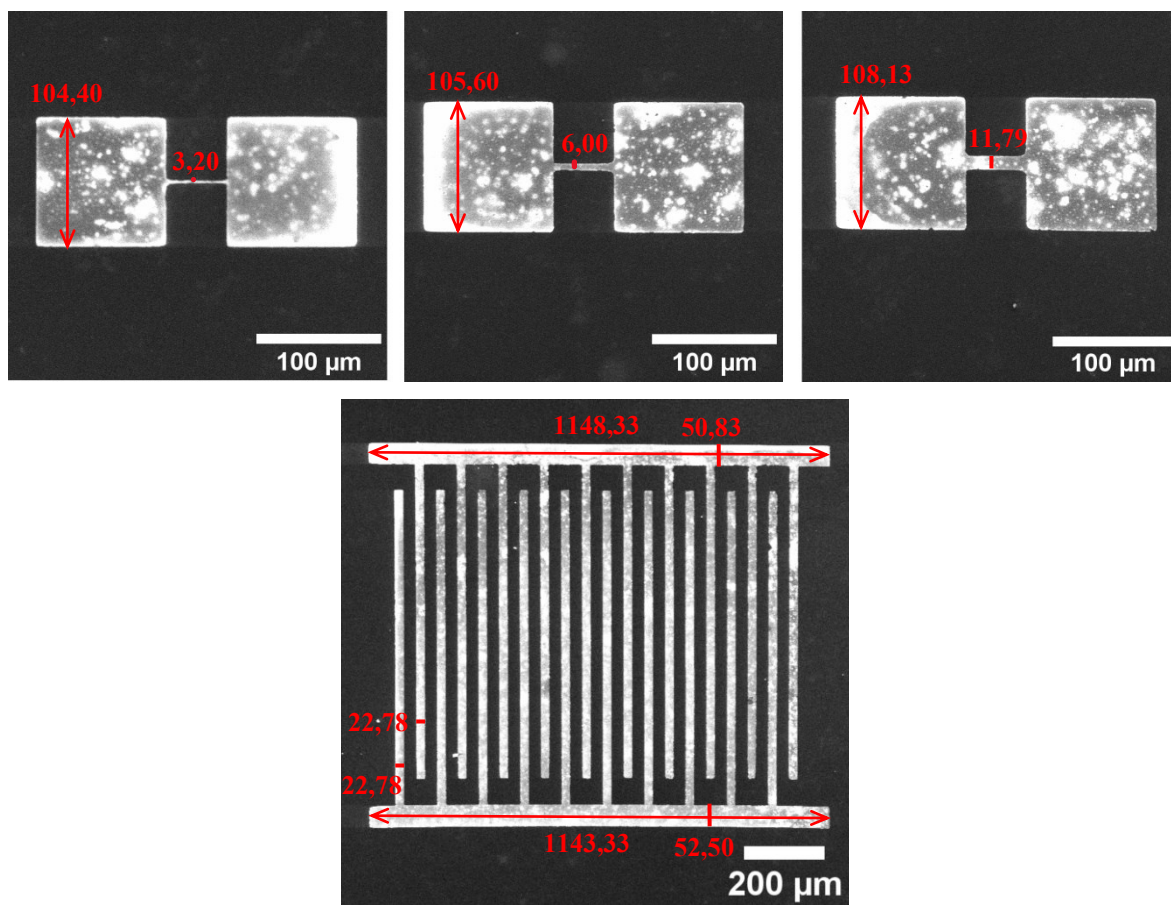
Jako doplňující metoda pro charakterizaci a srovnání připravených struktur byla zvolena SEM umožňující lepší rozlišení. Ze získaných snímků byly pomocí programu ImageJ odečteny rozměry vodivých linek.

8.3.1 Struktury z Ag naprášené přes masku z polymerní vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM



Obrázek 32 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – nahoře, struktura B – vlevo dole, struktura C – vpravo dole), naměřené rozměry jsou uvedeny v mikrometrech

8.3.2 Struktury z Ag naprášené přes masku z polymerní vrstvy z 20 %hm. $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA 6000 RPM



Obrázek 33 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 20 %hm. $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – nahoře, struktura B – dole), naměřené rozměry jsou uvedeny v mikrometrech

Na obr. 32 a obr. 33 lze vidět snímky získané snímáním povrchu vzorku pomocí SEM. Vytvořené struktury odpovídají navrženým strukturám (viz obr. 25). Na strukturách a obzvláště na obr. 33 lze vidět mapy na povrchu struktur. Je zřejmé, že vrstva Ag není uniformní. Další analýza uniformity vrstvy a optimalizace procesu přípravy pro dosažení rovnoměrných vrstev by mohly být předmětem dalšího bádání. Stejně jako při charakterizaci optickou mikroskopií a mechanickou profilometrií, dosahují naměřené rozměry vodivých linek vyšších hodnot u struktur připravených přes masku z polymerního rezistu z PMMA s nižší molární hmotností.

8.3.3 Rozměry vodivých linek

8.3.4 Struktury typu A

Tabulka 11 - Porovnání rozměrů naměřených pomocí programu ImageJ na snímcích získaných SEM s navrženými rozměry pro struktury typu A

Navržený rozměr [μm]	Maska z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA [μm]	Maska z 20 %hm. 15 000 g·mol ⁻¹ PMMA [μm]
2	0	3,20
5	3,28	6,00
10	9,02	11,79

8.3.5 Struktury typu B

Tabulka 12 - Porovnání rozměrů naměřených pomocí programu ImageJ na snímcích získaných SEM s navrženými rozměry pro struktury typu B

Pořadí vodivé linky [-]	Maska z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA [μm]	Maska z 20 %hm. 15 000 g·mol ⁻¹ PMMA [μm]
1	16,39	22,78
2	16,81	22,78
3	16,53	22,22
4	15,69	21,67
5	15,97	22,22
6	17,23	23,06
7	16,81	21,67
8	15,69	22,78
9	16,25	21,67
10	17,09	21,67
11	15,97	21,67
12	17,37	22,22
13	16,81	22,22
14	17,37	21,67
15	15,69	22,36
16	16,81	22,22
17	16,53	23,06
18	16,81	21,67
19	15,97	22,78
20	17,09	22,22
Průměr [μm]	16,54 ± 0,13	22,23 ± 0,12
Navržený rozměr [μm]	20	20

8.3.6 Struktura typu C

Tabulka 13 - Porovnání rozměrů, naměřených pomocí programu ImageJ na snímcích získaných SEM, s navrženými rozměry pro struktury typu C

Pořadí vodivé linky [-]	Maska z 10 %hm. 350 000 g·mol ⁻¹ PMMA [μm]
1	47,87
2	46,54
3	47,43
4	46,99
5	46,99
6	47,87
7	46,54
8	46,99
9	47,43
10	47,87
11	46,54
12	47,87
Průměr [μm]	47,24 ± 0,16
Navržený rozměr [μm]	50

8.4 Srovnání výsledných rozměrů na základě způsobu charakterizace

Tabulka 14 - Srovnání rozměrů vodivých linek získaných SEM a mechanickou profilometrií pro struktury připravené přes masku z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA

Typ struktur	A			B	C
	Linka 1	Linka 2	Linka 3		
Mechanická profilometrie [μm]	0	6,464	12,422	19,03 ± 0,09	50,4 ± 0,2
SEM [μm]	0	3,28	9,02	16,54 ± 0,13	47,24 ± 0,16
Navržený rozměr [μm]	2	5	10	20	50

Tabulka 15 - Srovnání rozměrů vodivých linek získaných SEM a mechanickou profilometrií pro struktury připravené přes masku z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA

Typ struktur	A			B
	Linka 1	Linka 2	Linka 3	
Mechanická profilometrie [μm]	8,411	11,822	14,355	25,01 ± 0,18
SEM [μm]	3,20	6,00	11,79	22,23 ± 0,12
Navržený rozměr [μm]	2	5	10	20

Tab. 14 a tab. 15 zobrazují porovnání naměřených rozměrů mechanickým profilometrem a SEM. Z rozměrů naměřených těmito metodami a optickou mikroskopií vyplývá, že struktury připravené přes masku z polymerního rezistu z PMMA s nižší molární hmotností dosahují větších rozměrů než struktury připravené přes masku z PMMA s vyšší molární hmotností.

ZÁVĚR

Teoretická část práce je zaměřena na princip fungování jednotlivých litografických technik a jejich postavení na poli výroby a vývoje polovodičových součástek. Je vysvětlen rozdíl mezi pozitivním a negativním polymerním rezistem a popsána metoda spin coating. Dále je věnována pozornost lift-off procesu a jednotlivým metodám nanášení cílového materiálu.

Praktická část práce je věnována přípravě struktur z vodivého materiálu na substrátu přes masku z polymerního rezistu. Polymerní maska byla připravena pomocí elektronové litografie. Metodou spin coating byly připraveny série polymerních vrstev. Na základě měření tloušťky vrstev mechanickým profilometrem (viz obr. 14) bylo zjištěno, že vrstvy spin coatované z polymerních roztoků, připravených z 10 %hm. $350\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ práškového PMMA v anisolu a z 20 %hm. PMMA $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA v anisolu, dosahují podobných tlouštěk. Proto byly vybrány pro zápis elektronovým svazkem za účelem porovnání chování polymerních rezistů připravených z PMMA o vyšší a nižší molární hmotnosti. Citlivostní testy ukázaly, že polymerní vrstvy připravené z 20 %hm. PMMA $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA v anisolu vykazují vyšší senzitivitu, a že k depozici dostatečného množství energie k vyvolání rezistu až na substrát, je u nich potřeba menší dávka.

Pro tvorbu struktur z Ag pomocí lift-off procesu byly navrženy struktury vodivých cest. Struktury z Ag byly následně charakterizovány pomocí optické mikroskopie, mechanické profilometrie a SEM. Bylo zjištěno, že struktury vytvořené přes masku z polymerního rezistu o 10 %hm. $350\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA dosahují rozměrů menších, než byly navržené hodnoty. Zatímco struktury vytvořené přes masku z polymerního rezistu o 20 %hm. $15\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ PMMA dosahují rozměrů větších.

V rámci práce byl proveden pokus o tvorbu struktur na polyimidové fólii. Vytvořené polymerní masky na polyimidové fólii vykazovaly defekty v podobě pokřivení tvaru struktur. Při pokusu o odladění procesu byl pozorován nestálý proud na detektoru, což bylo pravděpodobně způsobeno nabíjením fólie. Z tohoto důvodu byl lift-off proveden pouze na křemíkovém substrátu. Další odladění procesu zápisu do vrstvy na polyimidové fólii by mohlo být předmětem dalšího bádání. Za zvážení by stálo využití jiné techniky, než je elektronová litografie.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] E. Sharma, R. Rathi, J. Misharwal, B. Sinhmar, S. Kumari, J. Dalal, A. Kumar, Evolution in Lithography Techniques: Microlithography to Nanolithography, *Nanomaterials* 12 (2022). <https://doi.org/10.3390/nano12162754>.
- [2] K. Ronse, Optical lithography—a historical perspective, *C R Phys* 7 (2006) 844–857. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2006.10.007>.
- [3] B.W. Smith, Optical projection lithography, in: *Nanolithography*, Elsevier, 2014: pp. 1–41. <https://doi.org/10.1533/9780857098757.1>.
- [4] B. Lin, Components in Optical Lithography, in: *Optical Lithography*, SPIE, 1000 20th Street, Bellingham, WA 98227-0010 USA, 2010: pp. 133–212. <https://doi.org/10.1117/3.821000.ch5>.
- [5] T.R. Groves, Electron beam lithography, in: *Nanolithography*, Elsevier, 2014: pp. 80–115. <https://doi.org/10.1533/9780857098757.80>.
- [6] W. Tabarelli, E.W. Lobach, Photolithographic method for the manufacture of integrated circuits, 4,346,164, 1982.
- [7] B.J. Rice, Extreme ultraviolet (EUV) lithography, in: *Nanolithography*, Elsevier, 2014: pp. 42–79. <https://doi.org/10.1533/9780857098757.42>.
- [8] N. Fu, Y. Liu, X. Ma, Z. Chen, EUV Lithography: State-of-the-Art Review, *Journal of Microelectronic Manufacturing* 2 (2019) 1–6. <https://doi.org/10.33079/jomm.19020202>.
- [9] J.P. Silverman, X-ray lithography: Status, challenges, and outlook for 0.13 μm , *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* 15 (1997) 2117–2124. <https://doi.org/10.1116/1.589231>.
- [10] A. Bharti, A. Turchet, B. Marmioli, X-Ray Lithography for Nanofabrication: Is There a Future?, *Frontiers in Nanotechnology* 4 (2022). <https://doi.org/10.3389/fnano.2022.835701>.
- [11] J.P. Silverman, Challenges and progress in x-ray lithography, *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena* 16 (1998) 3137–3141. <https://doi.org/10.1116/1.590452>.
- [12] D.M. Jens Als-Nielsen, Sources, in: *Elements of Modern X-ray Physics*, Wiley, 2011: pp. 29–67. <https://doi.org/10.1002/9781119998365.ch2>.
- [13] W.J. Dauksher, Masks for X-ray Lithography, in: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, 2001: pp. 5206–5211. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00905-0>.
- [14] M.A. McCord, M.J. Rooks, Electron Beam Lithography, in: *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication. Volume 1: Microlithography*, SPIE PRESS, n.d. <https://doi.org/10.1117/3.2265070.ch2>.
- [15] C. Vieu, F. Carcenac, A. Pépin, Y. Chen, M. Mejias, A. Lebib, L. Manin-Ferlazzo, L. Couraud, H. Launois, Electron beam lithography: resolution limits and applications, *Appl Surf Sci* 164 (2000) 111–117. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00352-4).
- [16] A. Pimpin, W. Srituravanich, Review on Micro- and Nanolithography Techniques and their Applications, *Engineering Journal* 16 (2012) 37–56. <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.1.37>.
- [17] Z. Cui, Nanofabrication by Electron Beam, in: *Nanofabrication*, Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 91–148. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39361-2_3.

- [18] D.F. Kyser, N.S. Viswanathan, Monte Carlo simulation of spatially distributed beams in electron-beam lithography, *Journal of Vacuum Science and Technology* 12 (1975) 1305–1308. <https://doi.org/10.1116/1.568524>.
- [19] F. Matějka, *Praktická elektronová litografie*, Ústav přístrojové techniky V ČR, 2012.
- [20] J.N. Helbert, *Handbook of VLSI Microlithography - Principles, Technology and Applications* (2nd Edition), (n.d.). <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHVLSIMP1/handbook-vlsi-microlithography/handbook-vlsi-microlithography>.
- [21] F. WATT, A.A. BETTIOL, J.A. VAN KAN, E.J. TEO, M.B.H. BREESE, ION BEAM LITHOGRAPHY AND NANOFABRICATION: A REVIEW, *Int J Nanosci* 04 (2005) 269–286. <https://doi.org/10.1142/S0219581X05003139>.
- [22] F.A. Stevie, L.A. Giannuzzi, B.I. Prenzler, The Focused Ion Beam Instrument, in: *Introduction to Focused Ion Beams*, Springer US, Boston, MA, 2005: pp. 1–12. https://doi.org/10.1007/0-387-23313-X_1.
- [23] M. Utlaut, Focused ion beams for nano-machining and imaging, in: *Nanolithography*, Elsevier, 2014: pp. 116–157. <https://doi.org/10.1533/9780857098757.116>.
- [24] A. Sarangan, Nanofabrication, in: *Fundamentals and Applications of Nanophotonics*, Elsevier, 2016: pp. 149–184. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-464-2.00005-1>.
- [25] H. van Wolferen, L. Abelmann, Laser Interference Lithography, in: T. Hennessy (Ed.), *Lithography: Principles, Processes & Materials*, Nova Science Publishers, Inc., 2011: pp. 133–148.
- [26] H. Jiang, Y. Sang, L. Zhang, M. Liu, Self-Assembly and Directed Assembly, in: *Materials Nanoarchitectonics*, Wiley, 2018: pp. 165–186. <https://doi.org/10.1002/9783527808311.ch9>.
- [27] C.A. MACK, Microlithography, in: H. Geng (Ed.), *Semiconductor Manufacturing Handbook*, 2nd Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2018. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259587696/toc-chapter/chapter8/section/section1>.
- [28] H.J. Levinson, *Principles of Lithography*, Fourth Edition, SPIE, 2019. <https://doi.org/10.1117/3.2525393>.
- [29] A. Novembre, S. Liu, Chemistry and processing of resists for nanolithography, in: *Nanolithography*, Elsevier, 2014: pp. 194–286. <https://doi.org/10.1533/9780857098757.194>.
- [30] A.S.H. Makhlof, Current and advanced coating technologies for industrial applications, in: *Nanocoatings and Ultra-Thin Films*, Elsevier, 2011: pp. 3–23. <https://doi.org/10.1533/9780857094902.1.3>.
- [31] S. Middya, G.S. Kaminski Schierle, G.G. Malliaras, V.F. Curto, Lithography and electrodes, in: *Chemical Solution Synthesis for Materials Design and Thin Film Device Applications*, Elsevier, 2021: pp. 277–307. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819718-9.00005-4>.
- [32] B. Ziaie, A. Baldi, M.Z. Atashbar, Introduction to Micro/Nanofabrication, in: *Springer Handbook of Nanotechnology*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2004: pp. 147–184. https://doi.org/10.1007/3-540-29838-X_5.
- [33] Z. Cui, Nanoscale Pattern Transfer by Deposition, in: *Nanofabrication*, Springer International Publishing, Cham, 2017: pp. 305–333. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39361-2_8.

- [34] K. Wasa, M. Kitabatake, H. Adachi, Thin Film Processes, in: Thin Film Materials Technology, Elsevier, 2004: pp. 17–69. <https://doi.org/10.1016/B978-081551483-1.50003-4>.
- [35] M. Ohring, Chemical Vapor Deposition, in: Materials Science of Thin Films, Elsevier, 2002: pp. 277–355. <https://doi.org/10.1016/B978-012524975-1/50009-4>.
- [36] S. Rossnagel, Sputtering and Sputter Deposition, in: Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques, Elsevier, 2001: pp. 319–348. <https://doi.org/10.1016/B978-081551442-8.50013-4>.
- [37] M. Leskelä, J. Niinistö, M. Ritala, Atomic Layer Deposition, in: Comprehensive Materials Processing, Elsevier, 2014: pp. 101–123. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00401-5>.
- [38] J.R. Arthur, Interaction of Ga and As₂ Molecular Beams with GaAs Surfaces, *J Appl Phys* 39 (1968) 4032–4034. <https://doi.org/10.1063/1.1656901>.
- [39] A.Y. Cho, Film Deposition by Molecular-Beam Techniques, *Journal of Vacuum Science and Technology* 8 (1971) S31–S38. <https://doi.org/10.1116/1.1316387>.
- [40] L.L. Chang, L. Esaki, W.E. Howard, R. Ludeke, G. Schul, Structures Grown by Molecular Beam Epitaxy, *Journal of Vacuum Science and Technology* 10 (1973) 655–662. <https://doi.org/10.1116/1.1318408>.
- [41] W.S. Knodle, R. Chow, Molecular Beam Epitaxy, in: Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques, Elsevier, 2001: pp. 381–461. <https://doi.org/10.1016/B978-081551442-8.50015-8>.
- [42] B.Y. Park, R. Zaouk, M.J. Madou, Fabrication of Microelectrodes Using the Lift-Off Technique, in: *Microfluidic Techniques*, Humana Press, New Jersey, n.d.: pp. 23–26. <https://doi.org/10.1385/1-59259-997-4:23>.
- [43] K.T. Arat, T. Klimpel, A.C. Zonneville, W.S.M.M. Ketelaars, , Carel Th. H. Heerkens, C.W. Hagen, Charge-induced pattern displacement in E-beam lithography, *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena* 37 (2019). <https://doi.org/10.1116/1.5120631>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

UV	ultraviolet – ultrafialové
R	rozlišení
k_1	Rayleightova konstanta
λ	vlnová délka
NA	numerická apertura
DUV	deep ultraviolet – hluboké ultrafialové
nm	nanometr
mm	milimetr
EUV	extreme ultraviolet
XRL	X-ray lithography – rentgenová litografie
EBL	electron-beam lithography – elektronová litografie
SEM	skenovací elektronový mikroskop
PMMA	polymethylmethakrylát
μm	mikrometr
FIB	focused ion beam – fokusovaný iontový svazek
p-beam	protonový svazek
NIL	nanoimprint lithography
LIL	laser interference lithography
DSA	directed self-assembly
RPM	revolutions per minute – otáčky za minutu
CVD	chemical vapor deposition – chemická depozice z plynné fáze
PVD	physical vapor deposition – fyzikální depozice z plynné fáze
ALD	atomic layer deposition – nanášení atomové vrstvy
MBE	molecular beam epitaxy – epitaxe molekulárním svazkem
PAVD	plasma assisted vapor deposition

LCVD	laser chemical vapor deposition
LPCVD	low pressure chemical vapor deposition
APCVD	atmospheric pressure chemical vapor deposition
LPE	liquid phase epitaxy – epitaxe z kapalné fáze
VPE	vapor phase epitaxy – epitaxe z plynné fáze
cm	centimetr
g	gram
Ag	stříbro
%hm.	hmotnostní procenta
$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	gram na mol
s	sekunda
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$	mikrocoulomb na centimetr čtvereční
pA	pikoampér

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 - Schéma opticko-litografického systému [1]</i>	13
<i>Obrázek 2 - Emisní spektrum rtuťové obloukové lampy [3]</i>	14
<i>Obrázek 3 - Schéma imerzní litografie</i>	15
<i>Obrázek 4 - Schéma rentgen-litografického systému [1]</i>	16
<i>Obrázek 5 - Maska pro XRL [13]</i>	17
<i>Obrázek 6 - Schéma elektronového litografického systému [16]</i>	18
<i>Obrázek 7 - Simulace rozptylu elektronů v rezistu PMMA na křemíkovém substrátu [18]</i>	20
<i>Obrázek 8 - Schéma zdroje iontového svazku využívajícího tekutého kovu [22]</i>	22
<i>Obrázek 9 - Schéma vyvolání rezistu (pozitivní-nahoře, negativní-dole)</i>	24
<i>Obrázek 10 - Spin coating [30]</i>	25
<i>Obrázek 11 - Leptání (vlevo), lift-off proces (vpravo) [31]</i>	26
<i>Obrázek 12 - Řezání křemíkového substrátu</i>	31
<i>Obrázek 13 - Měření tloušťky vrstvy PMMA na křemíkovém substrátu mechanickým profilometrem</i>	33
<i>Obrázek 14 - závislost tloušťky vrstvy polymerního rezistu PMMA na substrátu na RPM pro 10 %hm 350k PMMA v anisolu a pro 10 %hm, 20 %hm a 30 %hm 15k PMMA v anisolu (křemíkový substrát – vlevo, polyimidová fólie – vpravo)</i>	34
<i>Obrázek 15 - Schéma citlivostního testu a nastavení parametrů v programu VegaTC</i>	35
<i>Obrázek 16 - Pohled na zapsané struktury citlivostního testu při měření mechanickým profilometrem (PMMA na křemíkovém substrátu)</i>	36
<i>Obrázek 17 - Citlivostní testy pro vrstvu z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (velikost stopy 21 nm-vlevo, 41 nm-vpravo)</i>	37
<i>Obrázek 18 - Úbytek tloušťky vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu v závislosti na velikosti stopy</i>	37
<i>Obrázek 19 - Citlivostní testy pro vrstvu z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (velikost stopy 21 nm-vlevo, 41 nm-vpravo)</i>	38
<i>Obrázek 20 - Úbytek tloušťky vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu v závislosti na velikosti stopy</i>	38
<i>Obrázek 21 - Citlivostní testy pro vrstvu z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové (velikost stopy 27 nm-vlevo, 51 nm-vpravo)</i>	39
<i>Obrázek 22 - Úbytek tloušťky vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové v závislosti na velikosti stopy</i>	39
<i>Obrázek 23 - Citlivostní testy pro vrstvu z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové (velikost stopy 2 nm-vlevo, 51 nm-vpravo)</i>	40
<i>Obrázek 24 - Úbytek tloušťky vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové v závislosti na velikosti stopy</i>	40
<i>Obrázek 25 - Schéma zapisovaných struktur s rozměry v mikrometrech (struktury A – vlevo nahoře, struktura B – vpravo nahoře, struktura C – dole)</i>	41

- Obrázek 26 - Struktury do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo nahoře, struktura B – vpravo nahoře, struktura C – dole)42
- Obrázek 27 - Struktury do vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo, struktura B – vpravo)43
- Obrázek 28 - Struktury do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové fólii (struktury A – vlevo, struktura B – vpravo)44
- Obrázek 29 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo nahoře, struktura B – vpravo nahoře, struktura C – dole)45
- Obrázek 30 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo, struktura B – vpravo) .46
- Obrázek 31 - Schéma přejezdu hrotu mechanického profilometru přes jednotlivé struktury47
- Obrázek 32 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – nahoře, struktura B – vlevo dole, struktura C – vpravo dole), naměřené rozměry jsou uvedeny v mikrometrech49
- Obrázek 33 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – nahoře, struktura B – dole), naměřené rozměry jsou uvedeny v mikrometrech50

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis citlivostního testu do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 2 - Struktury z Ag vytvořené pomocí masky z vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu (struktury A – vlevo, struktura B – vpravo) .</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 3 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis citlivostního testu do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové fólii</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 4 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis citlivostního testu do vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové fólii</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 5 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis struktur do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis struktur do vrstvy z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na křemíkovém substrátu.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 7 - Hodnoty proudu ve svazku a velikosti stopy pro zápis struktur do vrstvy z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA 6000 RPM na polyimidové fólii.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 8 - Porovnání naměřených rozměrů mechanickým profilometrem s navrženými rozměry pro struktury typu A</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 9 - Porovnání naměřených rozměrů mechanickým profilometrem s navrženými rozměry pro struktury typu B</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 10 - Porovnání naměřených rozměrů mechanickým profilometrem s navrženými rozměry pro struktury typu C.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 11 - Porovnání rozměrů naměřených pomocí programu ImageJ na snímcích získaných SEM s navrženými rozměry pro struktury typu A.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 12 - Porovnání rozměrů naměřených pomocí programu ImageJ na snímcích získaných SEM s navrženými rozměry pro struktury typu B.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 13 - Porovnání rozměrů, naměřených pomocí programu ImageJ na snímcích získaných SEM, s navrženými rozměry pro struktury typu C</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 14 - Srovnání rozměrů vodivých linek získaných SEM a mechanickou profilometrií pro struktury připravené přes masku z 10 %hm. 350 000 g·mol⁻¹ PMMA</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 15 - Srovnání rozměrů vodivých linek získaných SEM a mechanickou profilometrií pro struktury připravené přes masku z 20 %hm. 15 000 g·mol⁻¹ PMMA.....</i>	<i>52</i>

