



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

KOMBINOVANÁ ELEKTRONOVÁ LITOGRAFIE

COMBINED ELECTRON BEAM LITHOGRAPHY

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Stanislav Krátký

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D.

BRNO 2020

KLÍČOVÁ SLOVA

Reliéfní elektronová litografie, hybridní litografie, difrakční optické elementy, optimalizace datové přípravy, proximity efekt, PMMA, plexisklo.

KEY WORDS

Grayscale e-beam lithography, hybrid lithography, diffractive optical elements, data prep optimization, proximity effect, PMMA, plexiglass.

UMÍSTĚNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Mikroelektroniky, Technická 3058/10, 616 00 Brno, Česká republika.

OBSAH

ÚVOD.....	5
1 CÍLE DISERTACE	6
2 VLASTNÍ PRÁCE A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	7
2.1 Metoda kombinované elektronové litografie	7
2.1.1 Fyzikální a materiálové předpoklady metody	7
2.1.2 Vhodnost jednotlivých expozičních systémů pro různé typy DOE v závislosti na systémových parametrech	9
2.1.3 Metoda kombinace expozic pomocí dvou systémů	12
2.2 Optimalizace přípravy expozičních dat pro binární struktury modifikací hranic objektů vstupních dat	14
2.2.1 Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na rychlost přípravy expozičních dat a dobu expozice	14
2.2.2 Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na výslednou optickou odezvu různých typů DOE.....	18
2.3 Optimalizace přípravy víceúrovňových struktur do tlustých vrstev rezistů	22
2.3.1 Nové přístupy k přípravě hlubokých DOE	23
2.3.2 Metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí ..	24
2.3.3 Aproximační metoda výpočtu expozičních dávek specifických víceúrovňových struktur	29
ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÍ LITERATURY	36
ŽIVOTOPIS	38
ABSTRACT.....	40

ÚVOD

Tato práce se zabývá reliéfní elektronovou litografií (EBL) a přípravou difrakčních optických elementů (DOE), což jsou planární mikrostruktury interagující se světlem s hloubkou od stovek nanometrů do jednotek až desítek mikrometrů. V celé práci jsou řešena tři témata zabývající se vývojem nových metod zefektivňujících přípravu zmíněných struktur.

Prvním řešeným tématem je kombinovaná reliéfní elektronová litografie, kde je cílem navrhnout metodu, která bude kombinovat expozice dvou systémů s rozdílnou energií elektronů primárního svazku. Konkrétní příklady budou prováděny na systémech Raith EBPG5000+ ES s Gaussovským svazkem (energie elektronů v primárním svazku 100 keV) a Tesla BS600 s tvarovaným svazkem (energie elektronů v primárním svazku 15 keV). Metoda kombinované reliéfní EBL by měla vést k efektivnějšímu využití jednotlivých systémů, kdy se různé mikrostruktury lépe připravují rozdílnými energiemi v primárním svazku.

Dalším tématem je optimalizace hranic objektů exponovaných struktur, které jsou zadávány ve formě obrazových vstupů. Vstupní obrazová data nesoucí informace o připravovaných DOE nemusí být vždy ve formátu, který je vhodný pro rychlou tvorbu expozičních dat pro daný systém. Na optimalizovaných datech se bude zkoumat vliv na rychlost přípravy expozičních dat a na dobu expozice komplexních DOE. Zároveň se zkoumá vliv této optimalizace na optickou odezvu testovaných DOE. Cílem je tedy získat informace, jež povedou k doporučením, které typy DOE se můžou optimalizovat a jakou měrou.

Třetím tématem je zkoumání možností přípravy hlubokých víceúrovňových DOE do plexisklových bloků jako náhrada soustavy rezist/substrát. Příprava hlubokých DOE pomocí EBL s sebou nese nežádoucí jevy, jako je nanášení tlustých rezistových vrstev na nosné substráty, rozdílné chování elektronů pro různé tloušťky rezistu apod. Expozice přímo do bloku plexiskla by mohla některé obtíže eliminovat. Dále byla navržena metoda způsobu zápisu hlubokých víceúrovňových struktur, která snižuje teplotní zátěž bloku plexiskla během expozice elektronovým svazkem a zároveň zvyšuje homogenitu vytvořených motivů. S přípravou velkoplošných hlubokých DOE souvisí i časová náročnost výpočtu korekcí rozptylových jevů při expozici. Proto byla navržena metoda, která dokáže stanovit expoziční dávky specifických víceúrovňových struktur pomocí aproximace modelů pro výpočet korekcí proximity efektu.

1 CÍLE DISERTACE

Cílem disertační práce je navrhnout metody, které povedou ke zvýšení efektivity při přípravě difrakčních optických elementů pomocí reliéfní elektronové litografie. Celé téma bylo rozděleno na tři separátní cíle:

1) Metoda kombinované elektronové litografie

Cílem je zkombinovat expozice dvou systémů pracujících s rozdílnou energií elektronů ve svazku a stanovit, které difrakční optické elementy jsou vhodné pro expozice jednotlivých systémů. Dále navrhnout metodu, kterou se budou kombinace motivů připravovat do téže vrstvy elektronového rezistu. Tento cíl byl rozdělen do tří částí:

- Fyzikální a materiálové předpoklady metody.
- Vhodnost jednotlivých expozičních systémů pro různé typy DOE v závislosti na systémových parametrech.
- Kombinace expozic dvou systémů.

2) Optimalizace přípravy expozičních dat pro binární struktury modifikací hranic objektů vstupních obrazových dat

Cílem je zjistit vliv optimalizace modifikace tvaru hranic objektů vstupních obrazových dat binárních struktur pro systém s Gaussovským svazkem pomocí snížení počtu hraničních bodů objektů motivů na rychlost přípravy expozičních dat, dobu expozice a odezvu vybraných optických parametrů testovaných DOE. Tento cíl byl rozdělen do dvou částí:

- Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na rychlost přípravy expozičních dat a dobu expozice.
- Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na výslednou optickou odezvu různých typů DOE.

3) Optimalizace přípravy víceúrovňových struktur do tlustých vrstev rezistů

Cílem je rozšířit možnosti přípravy hlubokých DOE s víceúrovňovým profilem struktury s využitím nového konceptu substrát/rezist a způsobu zápisu takovýchto struktur a zároveň zjednodušit aplikaci PEC na specifický případ takovýchto struktur. Tento cíl byl rozdělen do tří částí:

- Nové přístupy k přípravě hlubokých DOE.
- Metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepřavidelným umístěním expo. polí.
- Aproximační metoda výpočtu expozičních dávek specifických víceúrovňových struktur.

2 VLASTNÍ PRÁCE A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

2.1 METODA KOMBINOVANÉ ELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE

Cílem této části práce je navrhnout metodu reliéfní elektronové litografie, která by kombinovala expozice dvou systémů s rozdílnou energií elektronů v primárním svazku. Zamýšlené expozice se budou provádět v rámci jedné rezistové vrstvy a proces vyvolání bude probíhat simultánně nebo sekvenčně. Cílem metody je rozšíření možností přípravy komplexních DOE především pro potřeby bezpečnostních hologramů.

2.1.1 Fyzikální a materiálové předpoklady metody

Vyšší energie elektronů v primárním svazku dovoluje exponovat rezist do větších hloubek. Díky tomu se dají v systémech s vyšší energií elektronů v primárním svazku vytvářet hlubší struktury. Pro stejný proces (rezist, vývojka, doba vyvolání atd.) se musí v případě vyšších energií elektronů v primárním svazku použít mnohem vyšší expoziční dávka. Mělké struktury (hloubky stovek nanometrů až jednotky mikrometrů) by mělo být výhodnější exponovat pomocí systému s nižší energií elektronů v primárním svazku.

Rozdílné energie elektronů v primárním svazku

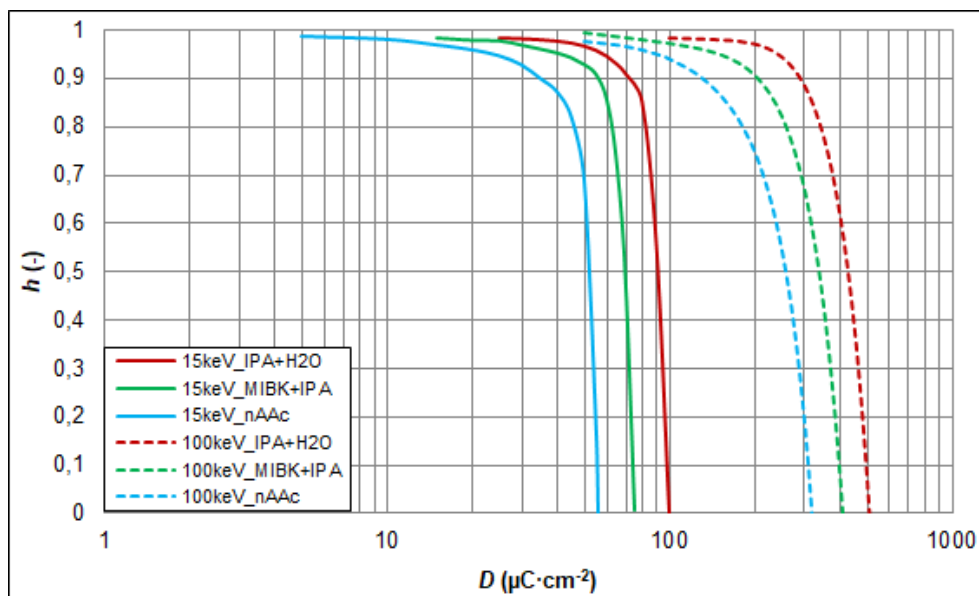
Energie elektronů v primárním svazku bude dále v nemalé míře ovlivňovat i tvar profilů vytvářených struktur. Pro nižší energii se bude proximity efekt (expozice rezistu i mimo oblast dopadu primárního elektronového svazku vlivem rozptylu elektronů v látce [1]) projevovat silněji, ale na mnohem kratší vzdálenost oproti vyšší energii. Tím, že pro nižší energii elektronů bude rychleji docházet k rozšiřování svazku s hloubkou rezistu (vyšší hodnota α – dopředně rozptýlené elektrony [1]), budou mít struktury tendenci být více zaoblené. Naopak u vyšších energií elektronů bude snadnější exponovat struktury s ostřejšími hranami a obecně s vyšším aspektem hloubka / šířka. Efekt zaoblení při expozici elektrony s nižší energií bude narůstat s vyšší hloubkou vytvářené struktury a zároveň bude klesat s rostoucí periodou struktury. Při návrhu DOE je nutné znát předpokládaný profil vytvářené struktury, protože výsledný tvar má významný vliv na rozložení účinnosti v difrakčních rádech.

Pro nižší energie elektronů v primárním svazku se jeho hodnota blíží hodnotě parametru α (hodnota β klesá a hodnota α roste). To jednak dodatečně ovlivňuje tvar profilu struktury, ale zároveň to znamená, že korekce proximity efektu musí být

aplikovány pouze na struktury s velmi malou průměrnou periodou. Pro soustavu křemíkový substrát a rezist PMMA jde o hodnotu kolem $1\text{ }\mu\text{m}$ (viz tabulka 1). Naopak pro vyšší energie elektronů v primárním svazku hodnota β narůstá až na desítky mikrometrů (pro stejnou soustavu substrát-rezist). Tím pádem na oblasti obsahující mikrostruktury s rozdílnou průměrnou periodou (do velikosti hodnoty parametru β) není nutné počítat korekce proximity efektu zvlášť pro každou strukturu.

Rezist a proces vyvolání

Rezist PMMA (molární hmotnost $350\text{k g}\cdot\text{mol}^{-1}$) byl zvolen jako vhodný pro kombinovanou technologii z důvodů dostupnosti různých variant (molární hmotnost), snadného zpracování a dosažitelného rozlišení [2]. Pro určení vhodných vývojek byl připraven test plošné citlivosti pro tloušťku rezistu 2500 nm . Byla testována vývojka na bázi MIBK (methylišobutylketon) ředěná izopropylalkoholem (IPA). Dále se testovala vývojka na bázi alkoholu (kombinace IPA a malého množství H_2O). Poslední testovanou vývojkou byla vývojka na bezalkoholové bázi – nAAc (n-amylester kyseliny octové). Test citlivosti se skládá z exponovaných políček, jejichž velikost musí být větší než dvojnásobek parametru β , aby byla měřená místa proximity efektem ovlivněna stejným způsobem. Vyvolání proběhlo ve vyhřívané lázni (teplota $21,5\text{ }^\circ\text{C}$) po dobu 6 minut pro všechny testované kombinace rezist-vývojka. Měření testů proběhlo na kontaktním profilometru. Na obr. 1 jsou uvedeny naměřené křivky citlivosti.



Obr. 1 Křivky citlivosti pro rezist PMMA 350k, hloubka 2500 nm , substrát Si, doba vyvolání 6 min, teplota lázně $21,5\text{ }^\circ\text{C}$, expozice s energiemi elektronů v primárním svazku 15 keV a 100 keV .

Z výsledných křivek citlivosti vyplývá, že pro kombinovaný proces, kdy by se jednotlivé expozice vyvolaly sekvenčně, bude vhodná kombinace vývojky IPA:H₂O a nAAc (kvůli největšímu odstupu dávek pro daný systém). Nejdříve se použije citlivější vývojka (nAAc) a následně méně citlivá (IPA:H₂O). Předpokládá se, že systém s vyšší energií elektronů v primárním svazku se použije pro tvorbu hlubších struktur (vyšší expoziční dávky), a proto bude výhodnější první expozici provést pomocí systému s energií elektronů v primárním svazku 15 keV. Pro tento systém by bylo navíc problematické přesné ladění struktur hlubších než několik stovek nanometrů problematické kvůli vysokému kontrastu testovaných vývojek.

Pro proces simultánního vyvolání obou expozic je možné použít kteroukoliv vývojku, nicméně z praktického hlediska se použití nejcitlivější vývojky jeví jako nejlepší varianta. Znamená to, že se pro obě expozice může použít nejmenší možná dávka, což teoreticky znamená rychlejší provedení expozice.

2.1.2 Vhodnost jednotlivých expozičních systémů pro různé typy DOE v závislosti na systémových parametrech

Na vhodnost jednotlivých expozičních systémů pro expozici různých typů DOE bude mít vliv především to, jakým způsobem probíhá samotná expozice na úrovni jednotlivých záblesků.

Způsob zápisu motivu litografem Tesla BS600

Systém BS600 pracuje s tvarovaným svazkem. Celý exponovaný motiv se dá rozdělit do tří úrovní – motiv_pole_razítka. První úroveň je celý exponovaný motiv. Ten musí být rozdělen na jednotlivá pole kvůli dosahu vychylování. Mezi jednotlivými poli musí dojít k pojezdu stolu nesoucího susbtrát. Tato druhá úroveň v sobě nese informaci o poloze stolů a velikosti stolů (vychylovacího pole). Třetí úrovní jsou již jednotlivé záblesky (razítka). Jednotlivá razítka v sobě nesou informaci o poloze, rozměru a o expoziční dávce. Všechny tvary a velikosti razítek mají stejnou proudovou hustotu, takže se zmenšujícím se rozměrem razítka se zmenšuje proud ve svazku. Jeden motiv může obsahovat razítka o různých velikostech i stoly o různých velikostech. Z těchto informací můžeme vyjádřit celkovou dobu expozice motivu jako:

$$t_{\text{expo}} = \sum_{i=1}^x n_i (T_{i,\text{beam}} + T_{\text{overhead}}) + mT_{\text{stage}} , \quad (1)$$

kde t_{expo} je celkový expoziční čas, n_i je počet všech razítek různých tvarů a velikostí exponovaných dávkou odpovídající času osvitů $T_{i,\text{beam}}$, T_{overhead} je režijní čas jednoho razítka (odclonění svazku, ustalovací čas apod.), m je počet všech pojezdů stolů a T_{stage} je čas potřebný k pojezdu jednoho stolu. T_{overhead} je pro všechny tvary a velikosti razítek stejný. Mění se pouze se vzdáleností mezi jednotlivými razítky. Uvažuje-li se způsob expozice, kdy jednotlivá razítka na sebe navazují, a je snaha minimalizovat počet vzdálených přeskoků, bude celková expoziční doba dána především celkovým časem osvitů a počtem razítek. Je tedy žádoucí využívat co největší velikost razítek k redukci expozičního času. Čas osvitů potřebný pro danou expoziční dávku souvisí i se stavem zdroje elektronů (katody). Proud generovaný katodou s životností katody klesá, čímž je pro stejnou dávku nutné použít delší dobu osvitů.

Způsob zápisu motivu litografem Raith EBPG5000+ ES

Systém EBPG5000+ ES pracuje s Gaussovským svazkem a princip expozice je jiný. V tomto případě se celý exponovaný motiv dá rozdělit do pěti úrovní – motiv_pole_subpole_trapezoidy_razítka. První úroveň je opět celý exponovaný motiv. Oproti předchozímu systému nese v sobě již první úroveň informací o velikosti stolů, maximální velikosti subpole a rozteč mezi jednotlivými razítky (BSS). Druhá úroveň jsou jednotlivá expoziční pole, na která je rozdělen motiv, kvůli dosahu první úrovně vychylování. Mezi nimi dochází k pojezdu stolu. Druhá úroveň v sobě nese informaci o poloze stolů. Třetí úroveň jsou subpole, na která jsou rozdělena jednotlivá pole kvůli dosahu druhé úrovně vychylování (maximální velikost $\sim 4,5 \times 4,5 \mu\text{m}^2$). Tato úroveň v sobě nese informaci o poloze subpolí v rámci daného stolu a jejich rozměru. Čtvrtou úrovní jsou trapezoidy obsažené v jednotlivých subpolích. To jsou lichoběžníkové nebo trojúhelníkové tvary o maximálním rozměru, který odpovídá rozměru subpole. Tato úroveň v sobě nese informaci o tvaru a umístění jednotlivých trapezoidů v rámci daného subpole a expoziční dávku. Poslední úrovní jsou jednotlivá razítka, která podle jasně daných pravidel vyplňují jednotlivé trapezoidy [3]. Celková expoziční doba jednoho motivu s jedním globálním nastavením může být vyjádřena následovně:

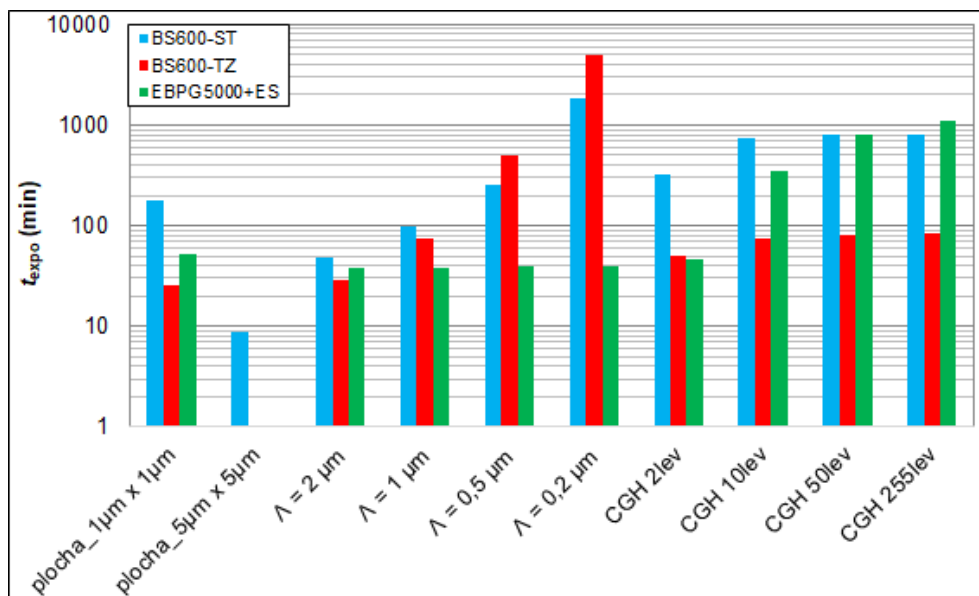
$$t_{\text{expo}} = \sum_{i=1}^x n_i T_{i,\text{beam}} + m T_{\text{sub}} + o T_{\text{trap}} + p T_{\text{stage}} , \quad (2)$$

kde t_{expo} je celkový expoziční čas, n_i je počet všech razítek exponovaných dávkou odpovídající času osvitů $T_{i,\text{beam}}$, m je počet všech subpolí, T_{sub} je režijní čas jednoho

subpole (ustalovací čas vychylovacího pole), o je počet všech trapezoidů, T_{trap} je režijní čas jednoho trapezoidu (ustalovací čas a odclonění svazku), p je počet všech pojezdů stolů a T_{stage} je čas potřebný k pojezdu jednoho stolu. Podobně jako u systému BS600, kdy T_{overhead} je závislý i na vzdálenosti mezi jednotlivými razítky, tak T_{sub} a T_{trap} jsou závislé na vzdálenosti mezi následujícími elementy. Snažíme se tedy při přípravě expozičních dat omezit celkový počet subpolí a trapezoidů a zároveň snížit rozsah expozičních dávek v jednom motivu.

Srovnání rychlosti expozice systému BS600 a EBPG5000+ ES

Pro srovnání rychlosti expozice různých typů motivu na obou systémech byl připraven expoziční test. Ten obsahoval tři typy motivů a jejich variace – plně exponovaná plocha, lineární periodická binární mřížka (perioda 2; 1; 0,5 a 0,2 μm) a počítačově generovaný hologram s různým počtem úrovní (bitmapa s rozlišením 1px = 500 nm, počet výškových úrovní 2; 10; 50 a 255). Expoziční dávky na obou systémech byly napočítány tak, aby odpovídaly křivkám citlivosti pro vývojku nAAc uvedeným na obr. 1. Pro expozici na systému BS600 byly využity oba dva módy – standardní (ST), technologický zoom (TZ) [4]. Pro všechny typy struktur se použila velikost stolů 2×2 mm². V případě systému EBPG5000+ ES byla pro všechny motivy použita hodnota BSS 50 nm, maximální velikost subpole (~4,5×4,5 μm^2) a maximální velikost stolů (~262×262 μm^2). Na obr. 2 jsou uvedeny výsledné expoziční časy zmíněných motivů [5]. Pro snadnější srovnání byly jednotlivé časy normovány na plochu expozice 100 mm².



Obr. 2 Srovnání rychlosti expozice systémů BS600 a EBPG5000+ ES pro různé typy motivů.

Z hlediska rychlosti expozice je tedy systém BS600 vhodnější pro hrubší typy struktur (průměrná λ kolem 2 μm a vyšší) bez ohledu na počet exponovaných úrovní. Systém EBPG5000+ES zase vyniká při expozici binárních struktur i těch s vysokým rozlišením.

Homogenita osvitu expozičních polí

Velký vliv na vizuální stránku provedených expozic má rozdělení celého motivu na jednotlivá expoziční pole (jednotlivá pole jsou vizuálně rozeznatelná). Dělení na jednotlivá pole je principiální omezení většiny litografických systémů. Rozeznatelnost polí je daná jednak přesností jejich navazování (presnost polohovatelnosti) a zároveň nehomogenitou osvitu vlivem deformace razítka způsobené vychylováním svazku. Obě nepřesnosti pak přispívají k celkové nedokonalosti optické funkce daného DOE. Systém EBPG5000+ disponuje velmi přesným polohováním stolu a navíc v kombinaci s malým expozičním polem jsou zmíněné nepřesnosti potlačeny více než na systému BS600. Ten sice umožňuje nastavit malé expoziční pole, nicméně to zvyšuje expoziční dobu a zároveň vlivem vyšší nepřesnosti polohování i zanesení více artefaktů do exponovaného motivu. Nicméně oproti systému EBPG5000+ je snadnější zavádět variace ve velikosti expozičního pole pro jeden motiv.

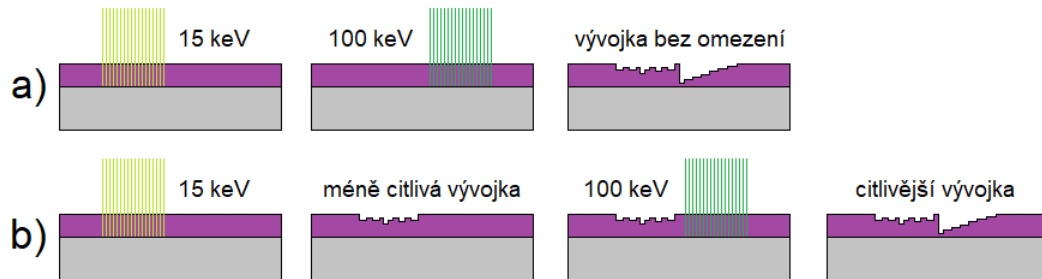
2.1.3 Metoda kombinace expozic pomocí dvou systémů

Celou metodu kombinované elektronové litografie můžeme podle výše uvedených poznatků rozdělit do následujících kroků:

- 1) Analýza mikrostruktur obsažených v motivu.
- 2) Volba expozičních systémů pro různé části motivů, volba vhodných vývojek.
- 3) Datová příprava jednotlivých částí motivu.
- 4) Příprava soukrytovacích značek na nosném substrátu.
- 5) Volba metody expozice a vyvolání, provedení expozice a vyvolání motivu.
- 6) Měření a vyhodnocení výsledku.

Jak už bylo naznačeno výše, kombinace expozic systémů s rozdílnou energií elektronů v primárním svazku se dá provést dvěma způsoby (obr. 3). V prvním případě se provedou expozice po sobě nezávisle na pořadí a k vyvolání dojde simultánně až po druhé expozici. Tento způsob klade vyšší nároky na sladění vyvolání obou expozic, zároveň se použije pouze jedna vývojka a expozice se svým zpracováním vzájemně neovlivňují. V druhém případě se sekvenčně zpracují jednotlivé expozice nezávisle na sobě, s tím, že pro vyvolání první expozice se

použije citlivější vývojka a pro vyvolání druhé expozice méně citlivá vývojka. Výhodou je naladění hloubek nezávisle na sobě pro každou expozici zvlášť. Je zde ovšem nebezpečí, že při nevhodné volbě vývojek se může negativně ovlivnit první expozice.



Obr. 3 Metoda kombinované elektronové litografie pro simultánní vyvolání motivů (a) a sekvenční vyvolání motivů (b).

Aplikace metody kombinované elektronové litografie

Pro demonstraci možností metody kombinované elektronové litografie byl připraven motiv obsahující několik typů DOE – lineární binární periodické mřížky, achromatická víceúrovňová struktura, CGH (dvouúrovňové, víceúrovňové), vysokofrekvenční mřížka, speciální fraktálová struktura.

Na obr. 4 jsou uvedeny snímky z výsledného motivu pro obě varianty metody kombinované reliéfní elektronové litografie. Je vidět, že i když jsou vstupy definující struktury pro oba systémy totožné, výsledné struktury dosahují odlišné optické odezvy, což rozšiřuje možnosti přípravy komplexních DOE především v oblasti bezpečnostních hologramů.



Obr. 4 Snímky motivu připraveného pomocí metody sekvenčního (vlevo) a simultánního (vpravo) vyvolání demonstrující odlišnosti optické odezvy pro expozice připravené pomocí systémů s energií elektronů v primárním svazku 15 keV a 100 keV.

2.2 OPTIMALIZACE PŘÍPRAVY EXPOZIČNÍCH DAT PRO BINÁRNÍ STRUKTURY MODIFIKACÍ HRANIC OBJEKTŮ VSTUPNÍCH DAT

Cílem této části práce je zjištění vlivu modifikace hranic objektů binárních struktur, které jsou definovány pomocí obrazových vstupů ve vysokém rozlišení, na rychlost přípravy expozičních dat, dobu expozice a na vybrané optické parametry různých typů DOE. Optimalizace bude probíhat na expozičních datech určených pro systém s Gaussovským svazkem. V případě sledování vlivu na optické parametry mikrostruktury budou změny modelovány pomocí zpětné rekonstrukce vstupních obrazců a pomocí expozice testovaných motivů a měření účinnosti difrakčních řádů.

2.2.1 Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na rychlost přípravy expozičních dat a dobu expozice

Jednou z možností jak definovat vstupní data pro expozici na elektronovém litografu jsou obrazové bitmapy nesoucí v sobě informaci o topologii dané struktury. Jestliže se jejich rozlišení blíží velikosti použitého BSS při zápisu struktury, může se jejich velikost blížit několika Mpx. Pokud se navíc jedná o definici velkoplošného DOE o velikosti několika cm², jejich počet může být několik stovek až několik tisíc. V takovém případě může být časová náročnost přípravy dat do formátu, který vyhovuje danému litografu, velmi vysoká. Situaci komplikuje i fakt, že většina systémů pracujících s Gaussovským svazkem funguje na principu rozdělení celého motivu na malé trapezoidy, které jsou většinou definovány čtyřmi, případně třemi hraničními body. To znamená, že každý jednotlivý pixel se chová jako jeden trapezoid, což z hlediska časové náročnosti není žádoucí jak pro přípravu dat, tak pro samotnou expozici. Výhodnější je, pokud hranice trapezoidů nejsou definovány pouze v pravoúhlém rastru, ale pod jakýmkoliv úhlem.

Popis použitého optimalizačního algoritmu

Optimalizací hranic jednotlivých objektů, které definují mikrostrukturu, by se dalo dosáhnout snížení počtu hraničních bodů, čímž by se dalo přiblížit vektorovému zadání mikrostruktury. Nicméně tento způsob úpravy hranic objektů může vést ke změně topologie mikrostruktury a tím i její optické funkce. Pro optimalizaci hranic objektů vstupních obrazových dat byl použit komerčně dostupný software GenISys BEAMER, který zároveň umožňuje tvorbu expozičních dat. Data budou optimalizována pro expozici systému Raith EBPG5000+ ES. Bylo testováno šest různých typů DOE, které se liší topologií mikrostruktury a optickou funkcí:

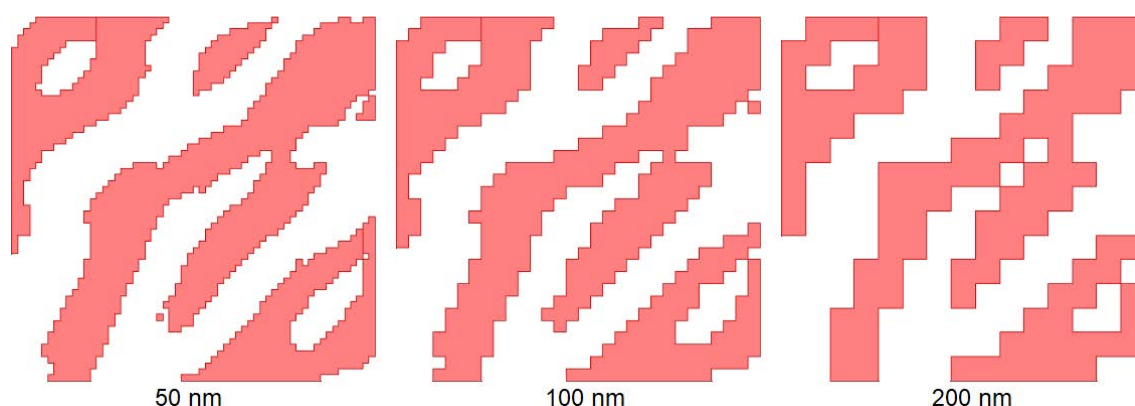
- lineární periodická mřížka (dále jen „BS-2“),

- dělič svazku s šesti difrakčními řády (dále jen „BS-6“),
- CGH s maximálním úhlovým odklonem od osy 40° (dále jen „CGH-40“),
- CGH s maximálním úhlovým odklonem od osy 60° (dále jen „CGH-60“),
- kombinace čtyř prvních motivů simulující strukturu bezpečnostního hologramu, kde jsou zastoupeny struktury s různou periodou, tvarem a hustotou (dále jen „combo“),
- matematicky vygenerovaná fraktálová struktura, která opět simuluje bezpečnostní hologram se zastoupením široké škály mikrostruktur (dále jen „frakt“) [6].

Celý postup přípravy expozičních dat z obrazových vstupů v prostředí GenISys BEAMER se dá rozdělit do tří kroků:

- 1) import vstupních bitmap, odstranění hranic mezi jednotlivými pixely uvnitř mikrostruktury a umístění bitmap na správnou pozici,
- 2) optimalizace vstupních bitmap (v tomto případě modifikace hranic objektů),
- 3) generování expozičních dat pro daný litograf.

Na obr. 5 je uveden výřez vstupních bitmap pro motiv CGH-60° pro různá rozlišení po importu a odstranění vnitřních hranic mezi jednotlivými pixely.



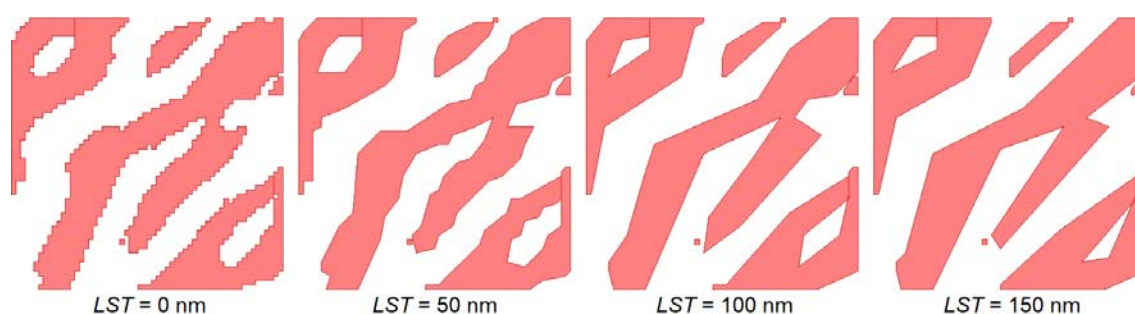
Obr. 5 Detail importované bitmapy ($3 \times 3 \mu\text{m}^2$) po odstranění vnitřních hranic mezi jednotlivými pixely pro různá rozlišení. Motiv CGH-60°.

Dalším krokem po úspěšném importu vstupních bitmap může být přímo generování expozičních dat nebo některé z následujících operací: výpočet PEC, kombinace s jiným motivem nebo optimalizace hranic objektů apod.

Optimalizační algoritmus použitý v GenISys BEAMER [7] funguje na principu redukce počtu hraničních bodů objektů, ze kterých se skládá daný motiv. Z hranice objektu se odstraní každý hraniční bod, který splňuje následující podmínku:

$$|d_{AB}| \leq LST, \quad (3)$$

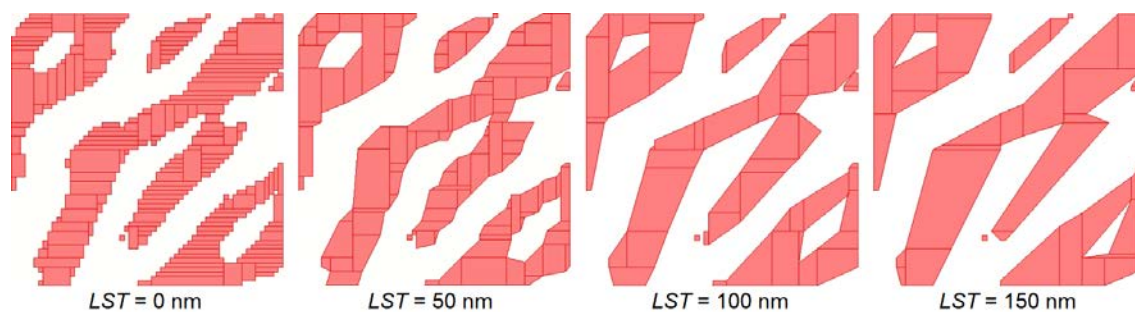
kde $|d_{AB}|$ je vzdálenost vyhodnocovaného bodu od spojnice mezi jeho dvěma sousedními body, parametr LST určuje dovolenou míru optimalizace aplikovanou na celý motiv. Každý objekt je definován posloupností hraničních bodů a ty jsou vyhodnocovány v pořadí, v jakém jsou definovány. Každý bod je vyhodnocen pouze jednou. Optimalizace může být tedy aplikována opakovaně do té doby, než budou hraniční body všech objektů v rámci motivu splňovat výše zmíněnou podmínku. Velikost parametru LST byla pro jednotlivá rozlišení vstupních bitmap volena tak, aby se projevila různá úroveň optimalizace na testovaných motivech. Na obr. 6 je uveden výsledek optimalizace na vybrané vstupní bitmapě s rozlišením $1 \text{ px} = 50 \text{ nm}$ pro různé hodnoty LST .



Obr. 6 Výsledek optimalizace vybraných vstupních bitmap s rozlišením $1 \text{ px} = 50 \text{ nm}$ pro různé hodnoty LST . Motiv $CGH-60^\circ$.

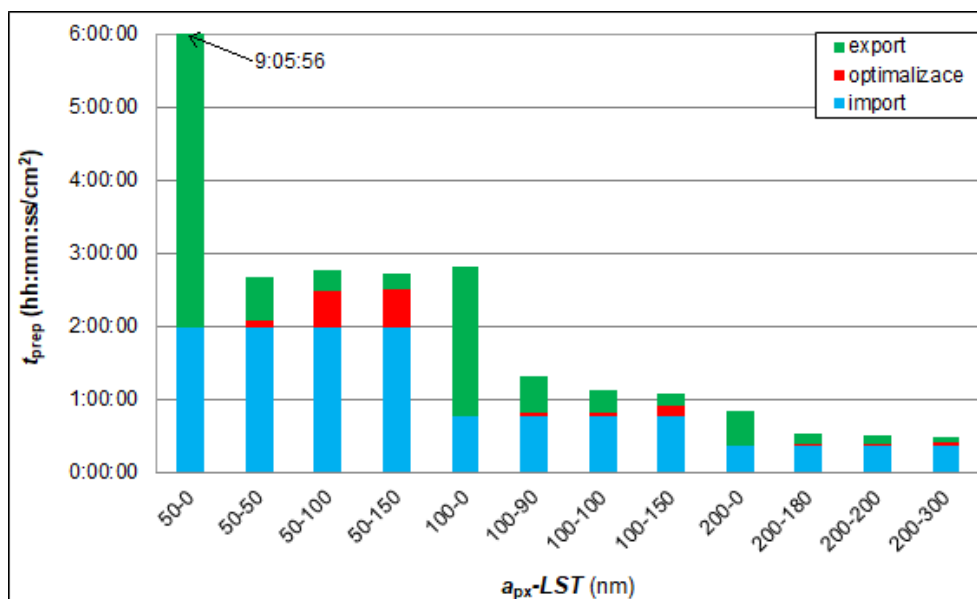
Generování expozičních dat pro systém Raith EBPG5000+ ES

Expoziční data všech testovaných variant byla vygenerována s totožným nastavením. Velikost pojezdů stolů byla $198 \mu\text{m}$, velikost subpolí $4,5 \mu\text{m}$, $BSS = 50 \text{ nm}$ a byla zvolena stejná strategie zápisu, aby bylo možné přímo porovnat jednotlivé varianty vyhlazení. Na obr. 7 je uvedeno, jak se změní expoziční data motivu $CGH-60^\circ$ po aplikaci různé míry optimalizace na vstupní bitmapu s rozlišením $1 \text{ px} = 50 \text{ nm}$.



Obr. 7 Vnitřní struktura expozičních dat po aplikaci různé míry optimalizace na vstupní bitmapu s rozlišením $1 \text{ px} = 50 \text{ nm}$. Motiv $CGH-60^\circ$.

Z topologie expozičních dat je patrné, že již po aplikaci minimální úrovně optimalizace došlo k výraznému poklesu počtu trapezoidů. Nicméně vliv optimalizace na snížení počtu trapezoidů je silně závislý na rozlišení vstupní bitmapy. U vstupní bitmapy s nižším rozlišením dochází po aplikaci optimalizace pouze k nepatrnému snížení počtu trapezoidů. V některých případech může dokonce dojít k jejich mírnému zvýšení, jelikož původní hraniční body umožňovaly vhodnější rozdělení motivu na jednotlivé trapezoidy.

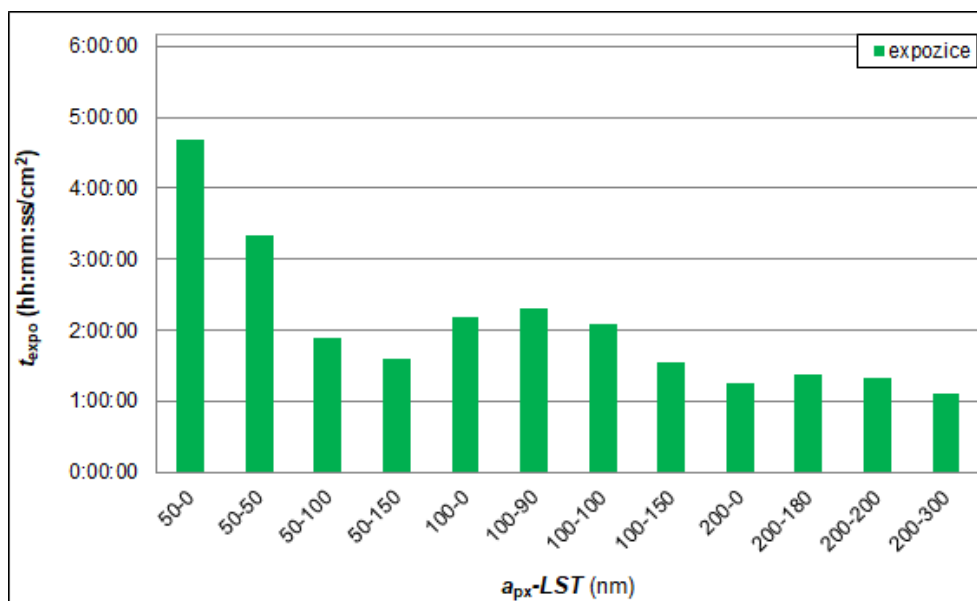


Obr. 8 Srovnání doby přípravy expozičních dat pro různá vstupní rozlišení a různou míru optimalizace. Motiv *combo*.

Na obr. 8 je uvedeno srovnání náročnosti časové přípravy expozičních dat pro různá rozlišení vstupních bitmap motivu *combo* pro různou míru optimalizace. Jednotlivé časy jsou normovány na 1 cm² motivu. Výsledky potvrzují předpoklad, že snížení počtu trapezoidů jednoznačně vede ke zkrácení doby přípravy expozičních dat. Doba přípravy se sice prodlouží o proces optimalizace, nicméně pokles času potřebný pro vygenerování expozičního souboru převáží tento nárůst. S větší mírou optimalizace roste časová náročnost procesu optimalizace (algoritmus odebírá větší počet hraničních bodů struktury) a zároveň klesá doba potřebná pro vygenerování expozičního souboru (generuje se nižší počet trapezoidů). Z toho plyne i nižší velikost expozičního souboru. Největší změna nastává v případě vyššího rozlišení, resp. rozlišení, které se blíží (nižší než dvojnásobek) nebo rovná použitému BSS.

Expozice testovaných motivů

Obr. 9 ukazuje, že k jednoznačnému zrychlení expozice dochází pouze v případě vysokého rozlišení vstupních bitmap. Zároveň se může změnit střída mikrostruktury, čímž se změní (zvýší) exponovaná plocha jednotlivých objektů, a tím naroste počet jednotlivých záblesků. Stejně tak může vlivem změny uspořádání mikrostruktur v motivu způsobené optimalizací dojít k odlišné posloupnosti expozice jednotlivých trapezoidů.



Obr. 9 Srovnání expoziční doby motivu s různým rozlišením vstupních bitmap a různou mírou optimalizace. Motiv *combo*.

Optimalizace vstupních bitmap ve většině případů zaručí zrychlení přípravy expozičních dat. Doba expozice se jednoznačně sníží v případě rozlišení vstupních bitmap rovnajících se použitému BSS. V případě nižšího rozlišení dochází k mírnému zpomalení expoziční doby a ke zrychlení dochází pouze v případě aplikace vysoké míry optimalizace.

2.2.2 Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na výslednou optickou odezvu různých typů DOE

Rekonstrukce signálu z fázové složky obrazu pomocí 2D-FFT

U motivů *BS-2*, *BS-6*, *CGH-40°* a *CGH-60°* může být provedena rekonstrukce optimalizované mikrostruktury nesoucí fázovou složku obrazu a výsledný signál může být srovnán s neoptimalizovanou variantou.

Srovnávány budou vždy pro příslušné rozlišení vstupních bitmap varianty s různou mírou optimalizace vůči neoptimalizované variantě. Obraz optimalizovaných variant bude v rozlišení 1 px = 50 nm, což je velikost BSS, se kterým byly jednotlivé varianty expozičních dat připraveny a následně i exponovány.

Z teoretických modelů se vyhodnotí níže uvedené parametry. Celková účinnost užitečných difrakčních řádů η_{ef} jako součet intenzity všech užitečných difrakčních řádů vztažený k součtu intenzity všech difrakčních řádu. Dále bude vyhodnocena homogenita užitečných difrakčních řádů H jako intenzita nejslabšího užitečného difrakčního řádu vztažená k intenzitě nejsilnějšího užitečného difrakčního řádu. Dalším vyhodnocovaným parametrem je *stray-light* (rozptýlené paprsky) η_s jako intenzita nejsilnějšího parazitního difrakčního řádů vztažená k součtu intenzit všech difrakčních řádů a η_{s-ef} , kdy bude vztažená k intenzitě nejsilnějšího užitečného difrakčního řádu. V tomto případě není do výpočtu *stray-light* zahrnut nultý řádu, který bude vyhodnocen zvlášť.

Srovnání optických parametrů různých typů DOE optimalizovaných a neoptimalizovaných variant – teoretické výpočty

V tabulce 1 jsou uvedeny teoreticky vypočítané hodnoty parametrů η_{ef} , H , η_0 , η_s a η_{s-ef} pro testované motivy a různé míry optimalizace pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.

Tab. 1 Srovnání teoretických hodnot parametrů η_{ef} , H , η_0 , η_s a η_{s-ef} pro různé motivy a různé úrovně optimalizace pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.

Motiv	LST (nm)	η_{ef} (%)	H (%)	η_0 (%)	η_s (%)	η_{s-ef} (%)
BS-2	0	81,06	100,0	0	4,5	11,1
	50	80,58	100,0	0,028	4,3	10,6
	100	80,09	100,0	0,202	4,0	10,1
BS-6	0	66,00	75,4	0	1,9	15,3
	50	64,60	81,7	0,005	2,1	17,4
	100	62,24	58,6	0,011	3,5	27,9
	150	58,46	47,5	0,025	4,4	35,4
CGH-40°	0	67,81	33,3	0,001	0	13,7
	50	67,22	31,8	0,021	0	15,5
	100	67,49	18,4	0,044	0	18,6
	150	66,41	2,8	0,050	0	24,5
CGH-60°	0	68,11	18,6	0	0	13,2
	50	66,89	15,1	0,029	0	17,0
	100	66,58	12,0	0,076	0	24,5
	150	63,81	1,6	0,102	0	25,7

Celková účinnost užitečných difrakčních řádů klesá s větší mírou optimalizace ve všech testovaných případech. Pokles je výraznější u motivů obsahujících jednodušší mikrostrukturu s nižší průměrnou periodou a u variant s nižším rozlišením. Homogenita užitečných difrakčních řádů motivů s jednoduchou topologií téměř neklesá (pokud ano, tak velmi pomalu), nicméně u složitějších mikrostruktur klesá s mírou optimalizace velmi rychle, někde téměř až k nule. Nultý difrakční řád vzrůstá ve všech případech a nárůst je strmější u nižších rozlišení vstupních bitmap. To je dáno narušením rovnováhy mezi poměrem plochy obou fázových úrovní. V případě parametru *stray-light* není situace jednoznačná. U složitějších mikrostruktur se dá říct, že tento parametr vzrůstá, což může být způsobeno narůstající intenzitou parazitních difrakčních řádů a poklesem účinnosti užitečných difrakčních řádů. U jednodušších mikrostruktur tento parametr může s mírou optimalizace i klesat, což se dá vysvětlit vznikem nových parazitních difrakčních řádů ve srovnání s neoptimalizovanou variantou, a tudíž poklesem nejsilnějšího parazitního difrakčního řádu.

Srovnání optických parametrů různých typů DOE optimalizovaných a neoptimalizovaných variant – měření exponovaných motivů

V případě měření na skutečných strukturách budou na motivech BS-2 a BS-6 vyhodnocovány parametry η_{ef} , H , η_0 , η_s a $\eta_{s\text{-ef}}$ a hodnoty účinností jednotlivých užitečných difrakčních řádů. η_{ef} se dá vyjádřit jako součet intenzity všech užitečných difrakčních řádů vztažený k intenzitě laserového svazku odraženého od rovného povrchu (do vyhodnocení tedy nebudou zahrnuty fresnelovské ztráty na rozhraní kov-vzduch). Homogenita užitečných difrakčních řádů H má stejnou definici jako v případě teoretických výpočtů. Účinnost nejsilnějšího parazitního difrakčního řádu η_s (*stray-light*) vyjma nultého řádu se pro měření na vytvořených strukturách dá vyjádřit jako intenzita nejsilnějšího parazitního difrakčního řádu vztažená k intenzitě odraženého laserového svazku. $\eta_{s\text{-ef}}$ má stejnou definici jako v případě teoretického výpočtu. Měření probíhalo na poloautomatické měřicí stanici, kde světelným zdrojem je laserová dioda $\lambda = 532 \text{ nm}$ [8]. U motivů, kde to není možné kvůli velikosti plochy měřicí sondy (CGH-40° a CGH-60°), budou srovnány vizuální změny rekonstruovaného signálu s teoretickým výsledkem rekonstrukce z hlediska rozložení intenzity.

Jednotlivé motivy byly naexponovány do rezistu PMMA (tloušťka $\sim 2500 \text{ nm}$) na křemíkové podložce. Vyvolání vývojkou nAAc probíhalo tak, aby byla co nejbližší dosažena hloubka rovna $\frac{1}{4} \lambda$ použitého laserového zdroje jakožto ideální hloubka

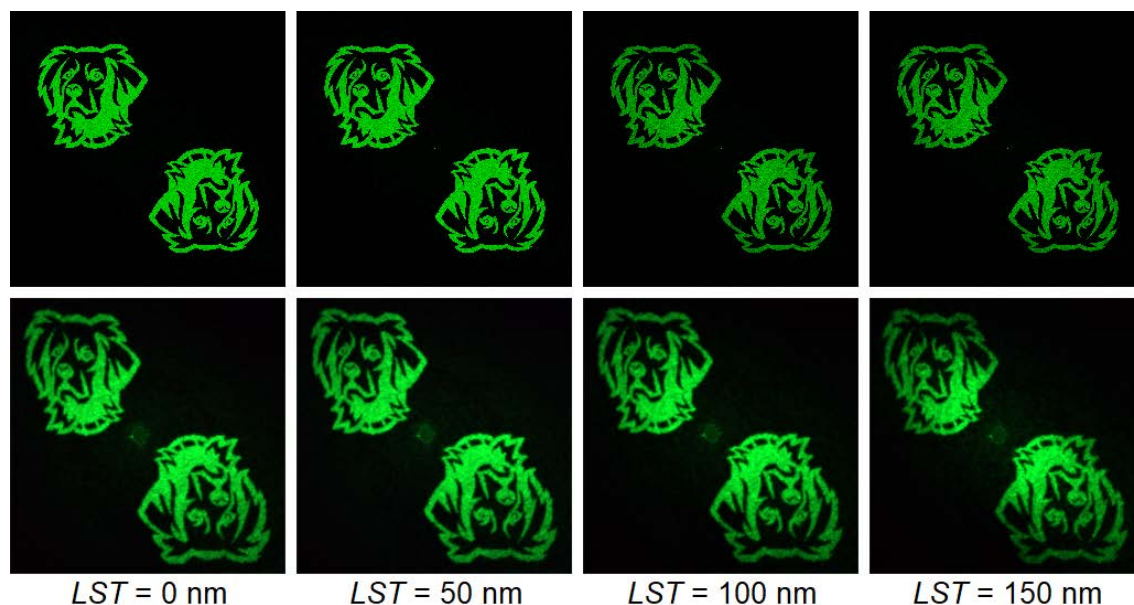
pro měření reflexních difrakčních řádů. Výsledný vzorek byl pokoven vrstvou 100nm Ag, aby byla dosažena co nejvyšší odrazivost. V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty parametrů η_{ef} , H , η_0 , η_s a η_{s-ef} vypočítané z naměřených intenzit motivů BS-2 a BS-6 pro různou míru optimalizace a pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.

Tab. 2 Srovnání naměřených hodnot parametrů η_{ef} , H , η_0 , η_s , η_{s-ef} pro motivy BS-2 a BS-6 pro různou míru optimalizace a pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.

Motiv	LST (nm)	η_{ef} (%)	H (%)	η_0 (%)	η_s (%)	η_{s-ef} (%)
BS-2	0	78,9	98,4	13,0	5,1	12,8
	50	79,5	99,1	13,1	4,7	11,9
	100	82,1	98,3	9,2	5,5	13,4
BS-6	0	75,9	39,0	14,9	1,4	8,3
	50	76,4	47,0	11,3	1,9	11,9
	100	71,3	64,5	7,3	4,8	33,9
	150	59,5	51,7	4,1	8,8	68,2

Naměřené hodnoty účinností jednotlivých difrakčních řádů vykazovaly nesymetrii oproti teoretickým výsledkům. To může být způsobeno jednak nepřesností měření, ale i celkovou nepřesností měřené konfigurace – především úhlová chyba sesouhlasení zdroje, substrátu s motivem a měřicí sondy. Již malá odchylka může v případě difrakčních řádů, které směřují do vyšších úhlů, způsobit nezanedbatelnou chybu. Další odchylky oproti naměřeným hodnotám mohou být způsobeny nepřesným naladěním hloubky mikrostruktur, nedokonalostí tvaru binárního profilu struktur a celkovým zkreslením tvaru profilu mikrostruktur pokovením. Dále u mikrostruktur s takto malou periodou bude již nezanedbatelný vliv polarizace, který matematický model použitý při teoretických výpočtech nezahrnuje. Dalším rozdílem oproti teoretickým výsledkům (uvedeným v tabulce 1) je výrazný nárůst nultého difrakčního řádu. K tomu bude nejvíce přispívat nesprávná střída mikrostruktury (nejen pro optimalizované varianty, pokovení způsobí změnu střídy i u neoptimalizované varianty) a také hloubka mikrostruktury. Z hlediska homogenity účinnosti užitečných difrakčních řádů jsou na tom praktická měření velmi podobně jako teoretické výsledky, kdy určitá míra optimalizace může tento parametr zlepšit. Celková účinnost užitečných difrakčních řádů klesá s větší mírou optimalizace v případě složitější mikrostruktury BS-6. Mikrostruktura BS-2 naopak vykazuje mírný nárůst účinnosti s větší mírou optimalizace.

Na obr. 11 je uvedeno srovnání teoretických intenzitních map se snímky rekonstruovaných signálů exponovaných motivů pro motiv CGH-40° pro různé úrovně vyhlazení pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.



Obr. 11 Srovnání teoretických intenzitních map – signálu (nahore) se snímky rekonstruovaných signálů skutečně exponovaných struktur (dole) motivu *CGH-40°* pro různou míru optimalizace a rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.

Rekonstruované signály z připravených struktur velmi dobře korespondují s teoretickými výsledky. Jediným výraznějším rozdílem je nižší intenzita signálu ve vyšších úhlech. To může souviset s výše popsaným přeléváním intenzit jednotlivých difrakčních řádů. Výsledek mohl být ovlivněn i způsobem, jakým probíhalo snímání rekonstruovaných signálů. Obrazce nebyly promítány na kulovou plochu se středem v místě dopadu laserového svazku, ale pouze na zakřivenou plochu v horizontálním směru. To způsobí, že difrakční řády ve vyšších úhlech urazí delší dráhu než difrakční řády v nižších úhlech a na stínítku je pak jejich vzájemná vzdálenost větší. To se může jevit jako zdánlivě nižší intenzita obrazce.

2.3 OPTIMALIZACE PŘÍPRAVY VÍCEÚROVŇOVÝCH STRUKTUR DO TLUSTÝCH VRSTEV REZISTŮ

Cílem této části je rozšířit možnosti přípravy hlubokých víceúrovňových DOE s obecným tvarem profilu mikrostruktury. Využitím konceptu, kdy se standardní soustava substrát/rezist nahradí pouze blokem rezistu, by se mohly eliminovat obtíže s nanášením tlustých vrstev rezistu (jednotky až desítky mikrometrů). Pro tento účel byla navržena metoda zápisu, která rozloží expoziční dávku nesoucí tepelnou energii do více úrovní, čímž se zároveň zvýší i celková homogenita motivu obsahujících DOE s hlubokým profilem. Tato metoda bude srovnána se známými přístupy z hlediska rychlosti přípravy expozičních dat, rychlosti expozice a homogenity výsledného motivu. S přípravou víceúrovňových mikrostruktur souvisí počítání PEC.

Pro specifické typy struktur byla navržena metoda výpočtu expozičních dávek, která využívá aproximaci referenčního modelu pro výpočet PEC, čímž dojde k výraznému zrychlení přípravy expozičních dat daných mikrostruktur.

2.3.1 Nové přístupy k přípravě hlubokých DOE

Blok plexiskla jako médium pro expozici pomocí EBL

Možnost exponovat přímo do bloku rezistu (v tomto případě do bloku PMMA – plexiskla) eliminuje problémy související s nanášením tlustých rezistových vrstev [9]. Při absenci nosného substrátu není tloušťka rezistu omezena zdola a materiál tak má totožné rozptylové charakteristiky i v případě, že povrch bloku rezistu není dokonale rovný.

Pro odvedení nahromaděného náboje během expozice je nutné opatřit blok rezistu vodivou vrstvou [9]. Většinou se používá tenká vrstva (několik desítek nanometrů) kovů jako hliník, chrom, zlato nebo stříbro, která se nanáší naprašováním, nebo napařováním. Dostupné jsou i vodivé polymery, které jsou z hlediska způsobu nanášení (nanáší se jako rezistové vrstvy např. odstředivým litím) k plexisklu nejšetnější [10]. Nicméně, jejich použití je limitováno nutností vypékat tyto vrstvy pro dosažení požadovaných vlastností za teplot blízkých 100 °C, což vede k deformaci plexisklového bloku. Bloky plexiskla se vyrábí dvěma způsoby, které mají vliv na výsledné vlastnosti materiálu – extruzí a litím. Přesnost tloušťky vyrobených bloků může být v rozmezí $\pm 15\text{--}30\%$ u litého plexiskla, v případě extrudovaného plexiskla je přesnost vyšší, a to asi $\pm 5\text{--}10\%$. Extrudované plexisklo může také obsahovat méně nečistot a má obvykle nižší molární hmotnost než lité plexisklo. Lité plexisklo je dále odolnější proti poškrábání a obsahuje méně mikroprasklin, které můžou vést v procesu elektronové litografie ke vzniku dalších defektů. Také je teplotně odolnější (má mírně vyšší teplotu tání) a vykazuje vyšší odolnost vůči některým rozpouštědlům. Způsobem výroby je u litého plexiskla zaručeno i nižší vnitřní mechanické pnutí [11].

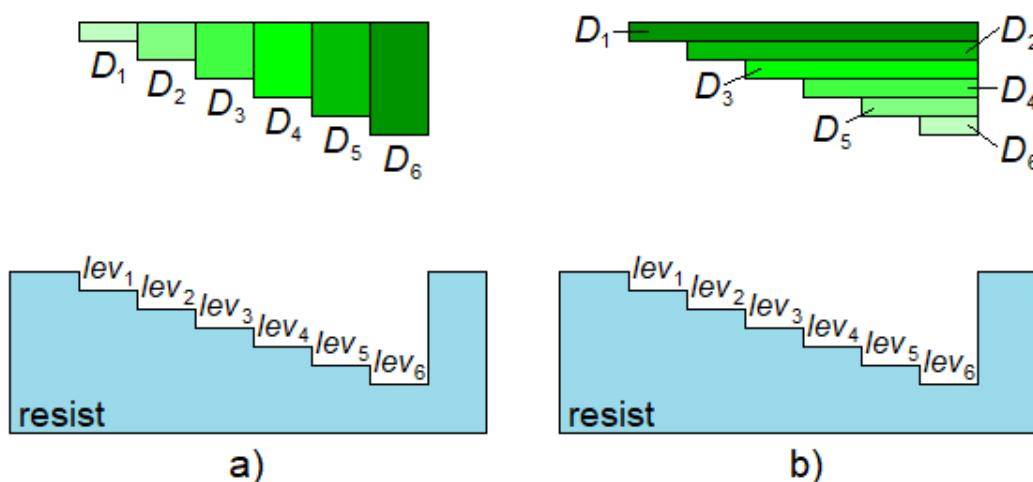
Podle výše uvedených vlastností a zjištěných skutečností je tedy pro potřeby elektronové litografie vhodnější lité plexisklo, které bude použito pro další experimenty v této práci. Napaření tenká vrstvy zlata ($\sim 30\text{ nm}$) zajistí odvedení náboje. Jako vývojka pro vyvolání plexiskla byla zvolena nAAc kvůli vyšší citlivosti. Z pohledu zahřívání povrchové vrstvy plexiskla během expozice je žádoucí použít co nejnížší expoziční dávky

2.3.2 Metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí

Prvním aspektem metody je způsob zápisu, kdy se jednotlivé úrovně motivu neexponují pouze v místě, kde má být danou dávkou dosaženo požadované úrovně, ale exponují se jako vrstva nesoucí v sobě topologii všech vrstev nad sebou (viz obr. 12), tzv. frézovaný zápis, kdy expoziční dávka dané vrstvy je dána následujícím vztahem:

$$D_{\text{lev,frez},n} = D_{\text{lev},n} - D_{\text{lev},(n-1)}, \quad (4)$$

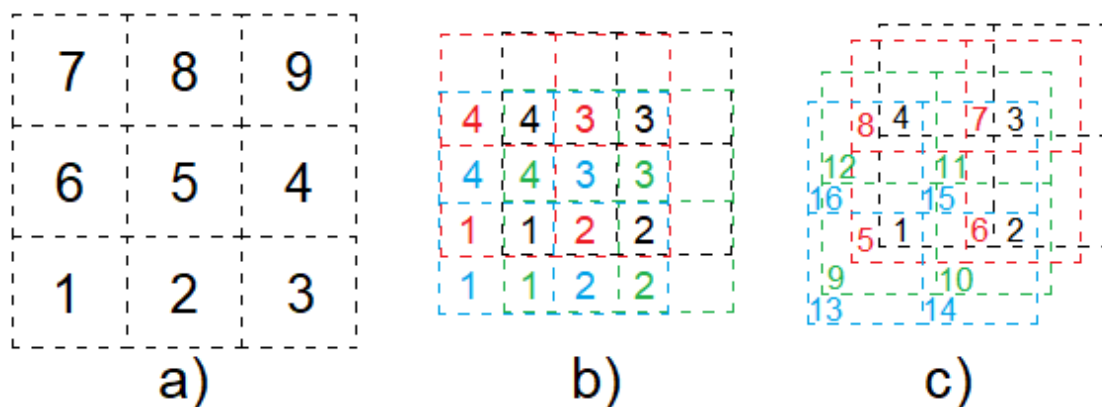
kde $D_{\text{lev},n}$ je expoziční dávka n -té úrovně při standardním zápisu a $D_{\text{lev},(n-1)}$ je expoziční dávka předcházející výškové úrovně.



Obr. 12 Srovnání standardního zápisu víceúrovňových struktur (a) a frézovaného zápisu (b).

Tím, že jednotlivé vrstvy (až na poslední vrstvu, která je totožná s topologií poslední výškové úrovně lev_6 dle obr. 12) v sobě nesou topologii více vrstev, se sice exponuje větší plocha, nicméně s nižší mírou členitosti. V případě frézovaného zápisu se také zvýší homogenita expozice uvnitř daného expozičního pole, jelikož hranice jednotlivých razítek nebo trapezoidů a subpolí se můžou vzájemně překrývat bez nebezpečí vzniku překryvu nebo naopak mezery mezi jednotlivými výškovými úrovněmi.

Druhým aspektem metody je způsob zápisu, kdy se dokončí zápis jedné vrstvy v celém motivu a až poté se přistoupí k expozici následující vrstvy. Rastr expozičních polí obsahujících příslušnou vrstvu je posunut vůči rastru expozičních polí obsahujících jinou vrstvu. Na obr. 13 je znázorněna topologie expozičních polí ve srovnání se standardním zápisem a běžně využívaným zápisem s vícenásobnými přeběhy [12].



Obr. 13 Srovnání topologie umístění expozičních polí. Standardní způsob zápisu (a), čtyřnásobný přeběh (b), metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelně umístěnými expozičními poli (c).

Počáteční souřadnice umístění expozičních polí v jednotlivých vrstvách se dají vyjádřit pomocí následujícího vztahu:

$$X_n = (n-1) \cdot \frac{s_x}{n} + d(0; \frac{s_x}{n}), \quad (5)$$

$$Y_n = (n-1) \cdot \frac{s_y}{n} + d(0; \frac{s_y}{n}), \quad (6)$$

kde X_n , Y_n je horizontální resp. vertikální souřadnice počátku umístování expozičních polí n -té vrstvy, s_x , s_y je horizontální resp. vertikální rozměr expozičního pole totožný pro všechny vrstvy exponovaného motivu a $d(0; s_x/n)$, $d(0; s_y/n)$ je interval, ze kterého se stanoví posun umístění počátku expozičních polí v n -té vrstvě vůči předcházející $(n-1)$ vrstvě. Tím se docílí, že nehomogenita osvětlení v rámci expozičních polí se rozloží v každé vrstvě jiným způsobem, což přispěje k celkové homogenizaci motivu. Tímto způsobem se mimo jiné (pokud to daný expoziční systém dovoluje z hlediska nastavení rozsahu velikosti proudu ve svazku) maximalizuje expoziční rychlost pro danou vrstvu ve srovnání se standardním přístupem, kde se výškové úrovně exponují v rámci jednoho expozičního souboru (např. systém EBPG5000+ ES). S počtem výškových úrovní (exponovaných vrstev) ovšem lineárně narůstá čas potřebný na pojezdy stolů mezi jednotlivými expozičními poli. Tím, že je mezi expozicemi jednotlivých vrstev časová prodleva a exponuje se nižší dávkou než celkovou dávkou příslušející dané výškové úrovni, se snižuje teplotní namáhání exponovaného místa a zvyšuje se doba pro odvedení nahromaděného náboje. Což je velmi výhodné pro expozici na vysoce nevodivých substrátech nebo přímo do bloku plexiskla.

Aplikace metody frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí

Předpokládaná přesnost vyvinuté metody bude nižší než běžně využívané způsoby zápisu a bude silně spjatá s přesností a stabilitou expozičního systému. Pro srovnání přesnosti byl připraven test na expozičním systému EBPG5000+ ES. Test obsahoval periodické mřížky s periodou 2 μm , 1 μm , 500 nm a 200 nm s horizontální i vertikální orientací. Mřížky byly exponovány standardním způsobem zápisu a frézovaným zápisem, a to dvěma, třemi a čtyřmi přeběhy. Parametry expozice (velikost proudu, BSS, exponovaná plocha) byly voleny tak, že jedna vrstva se exponovala vždy 150 minut. Motiv jednotlivých mřížek se exponoval v rozích čtverce se stranou 50 mm pro simulaci velkoplošného DOE.

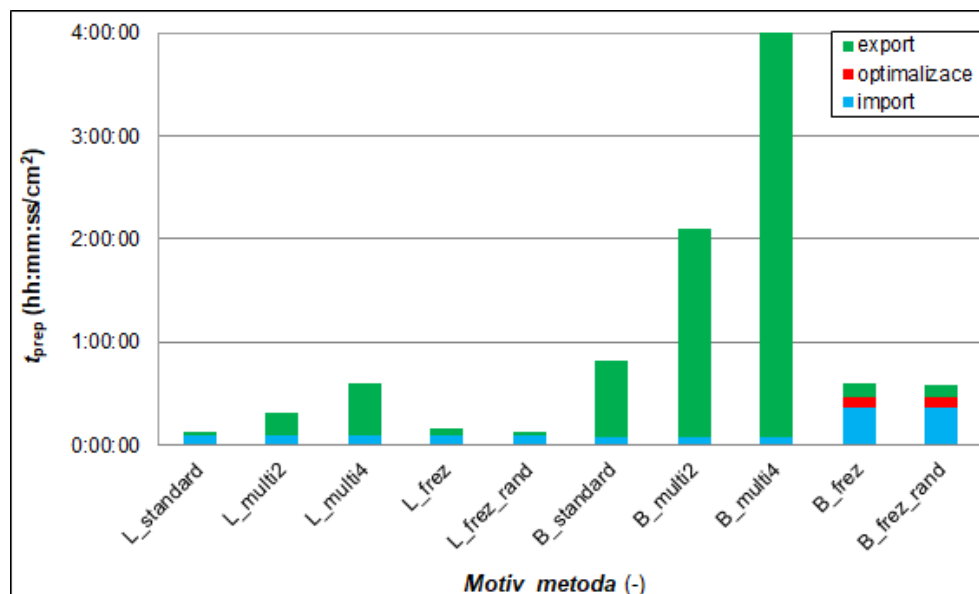
Celý test byl proveden čtyřikrát. Výsledky testů potvrzují to, co bylo naznačeno výše, že přesnost sesazení jednotlivých vrstev je dána především přesností expozičního systému a jeho stabilitou. Jednotlivé výsledky testů provedených na expozičním systému EBPG5000+ ES neukázaly žádnou souvislost se vzrůstající nepřesností s počtem exponovaných vrstev daného motivu. Dá se pouze říci, že čím větší bude počet vrstev exponovaného motivu, tím vyšší bude také pravděpodobnost, že dojde k nesprávnému sesazení některé z vrstev. Na systému EBPG5000+ ES dochází podle provedených testů k nepřesnosti sesazení některé z vrstev nejvýše ~70 nm.

Pro otestování metody z hlediska časové náročnosti přípravy expozičních dat, doby expozice a především zvýšení homogenity exponovaného motivu byly připraveny dva testovací motivy. Jedním byla achromatická 8úrovňová struktura. Motiv byl definován pomocí obrazových vstupů s rozlišením 1 px = 200 nm. Druhým motivem byla 16úrovňová Fresnelova čočka definovaná pomocí vektorových vstupů s rozlišením hraničních bodů jednotlivých úrovní 1 nm. Oba dva motivy byly navrženy pro hloubku struktury 3000 nm. Pro vygenerování expozičních dat byly použity totožné parametry. Velikost BSS = 50 nm, velikost expozičního pole 200×200 μm^2 , totožná strategie zápisu v rámci expozičního pole. Expoziční data byla připravena pro expozici pomocí následujících metod:

- 1) Standardní způsob zápisu dle obr. 19a).
- 2) Dva přeběhy pro všechny výškové úrovně.
- 3) Čtyři přeběhy pro všechny výškové úrovně.
- 4) Frézovaného zápisu, kdy se v expozičním poli exponují všechny vrstvy.

5) Metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelně umístěnými expozičními poli.

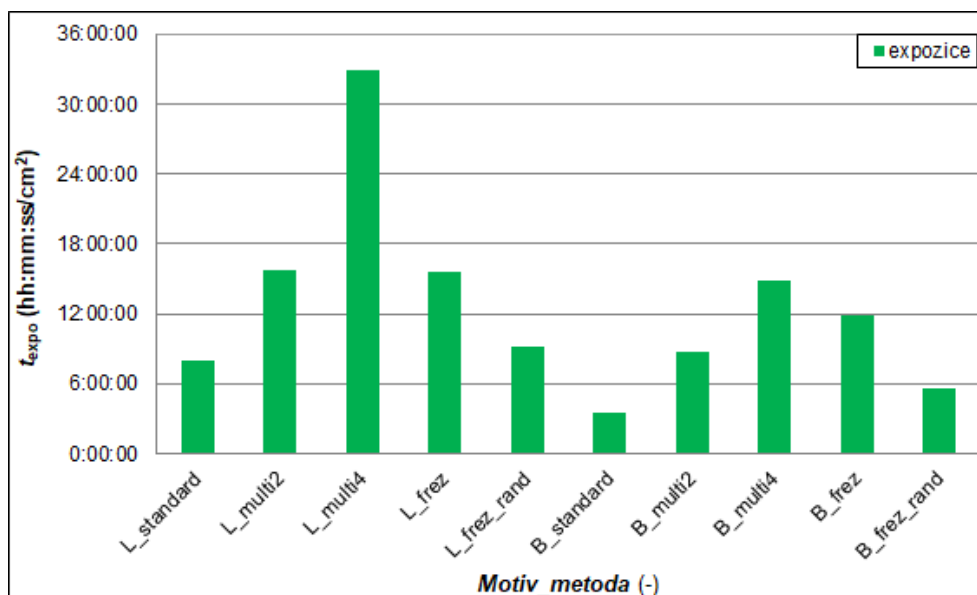
Na obr. 14 je uvedeno srovnání časové náročnosti přípravy expozičních dat jednotlivých metod.



Obr. 14 Srovnání časové náročnosti přípravy expozičních dat pro různé metody zápisu exponovaného motivu. Doba přípravy je normována na 1 cm² motivu. *L* označuje motiv Fresnelovy čočky a *B* označuje achromatickou strukturu.

Z výsledků vyplývá, že metoda frézovaného zápisu je z hlediska časové náročnosti přípravy expozičních dat srovnatelná se standardním způsobem zápisu. Frézovaný způsob zápisu obsahuje celkově větší plochu k expozici, nicméně právě větší plocha objektů umožňuje jejich efektivnější rozdělení do trapezoidů a subpolí, a tudíž nemusí dojít ke zpomalení přípravy expozičních dat. Navíc pro vstupní data v obrazovém formátu (achromatický motiv) je možné využít optimalizaci prezentovanou v kapitole 2.2, což vede ke zrychlení přípravy expozičních dat. V případě metody vícenásobných přeběhů dochází lineárně ke zpomalení přípravy dat, protože se pro každý přeběh připravuje celý motiv znovu.

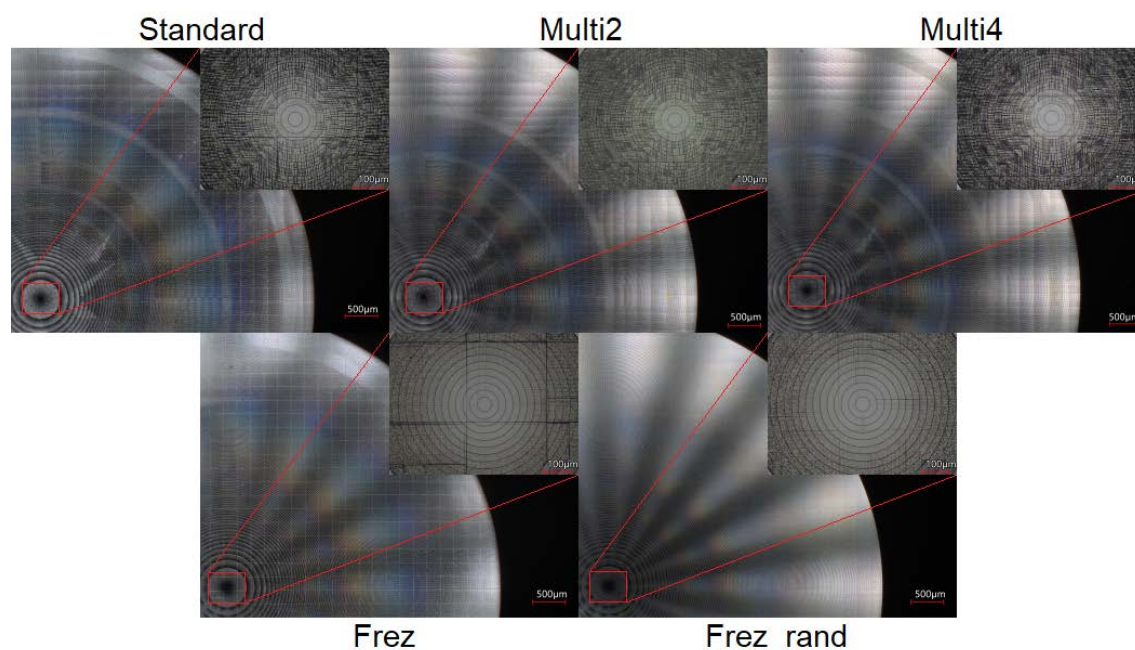
Expozice jednotlivých variant byla provedena do bloku litého plexiskla. Vyvolání proběhlo vývojkou nAAc v lázni při teplotě 21,5 °C po dobu 6 minut. Vytvořené motivy byly pokoveny 100 nm vrstvou stříbra pro zvýraznění všech potenciálních defektů, které ovlivňují homogenitu exponovaného motivu. Na obr. 15 je uvedeno srovnání expoziční doby pro testované metody zápisu.



Obr. 15 Srovnání expoziční doby motivů *L* (Fresnelova čočka) a *B* (achromatická struktura) pro různé metody zápisu motivů.

Rychlost expozice na systému EBPG5000+ ES při použití standardního způsobu zápisu bude v případě testovaných motivů silně závislá na rozsahu expozičních dávek (resp. na poměru mezi nejvyšší a nejnižší expoziční dávkou). Doba expozice pomocí vícenásobných přeběhů narůstá s počtem přeběhů lineárně, podobně jako příprava expozičních dat. V případě frézovaného způsobu zápisu výrazně narůstá exponovaná plocha, rozsah dávek se změní, podle dané expozice může být nižší nebo vyšší než standardní způsob zápisu (dle vztahu 3). Pokud by byl rozdíl expozičních dávek pro jednotlivé úrovně konstantní, čas expozice se nemusí výrazně změnit (zrychlení při expozici konstantní dávkou může převážit nad zvětšením exponované plochy). U metody frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelně umístěnými expozičními poli je situace totožná z hlediska nárůstu exponované plochy. Navíc čas expozice stoupá s počtem vrstev z hlediska pojezdů stolů. Na druhou stranu se každá vrstva může exponovat maximální možnou rychlostí (pokud daný systém dovoluje pro dané BSS nastavit příslušnou hodnotu proudu ve svazku).

Na obr. 16 jsou uvedeny snímky Fresnelovy čočky z optického mikroskopu pro různé způsoby zápisu ilustrující vliv na homogenitu exponovaného motivu.



Obr. 16 Srovnání homogenity motivu Fresnelova čočka pro různé způsoby zápisu. Snímky z optického mikroskopu.

Ze snímků je patrné, že vyvinutá metoda dosahuje nejvyšší homogenity motivu. Nicméně ani tak není výsledek expozice dokonalý. K dalšímu zvýšení homogenity expozice by vedlo zvýšení počtů výškových úrovní, případně rozdělení některých úrovní na více částí. U achromatických motivů může tato metoda vést ke zvýšení chromatičnosti připravených DOE, což může být nežádoucí. Nicméně šum vznikající použitím jiných metod zápisu není zcela definovatelný, takže při návrhu takovýchto struktur není výsledná optická odezva zcela pod kontrolou.

2.3.3 Aproximační metoda výpočtu expozičních dávek specifických víceúrovňových struktur

Vzhledem k tomu, že se PEC počítá v objemu rezistu ve vysokém rozlišení, je takový výpočet pro velkoplošné víceúrovňové DOE obsahující mnoho typů různých mikrostruktur s různým tvarem profilu časově velmi náročný (až desítky hodin na stolních PC). Časová náročnost závisí kromě rozlišení, ve kterém se korekce počítají, i na komplexnosti fyzikálního modelu popisujícího rozptylové jevy v rezistu. Přesto že se korekce počítají v objemu rezistu, je výsledkem dvojrozměrná mapa určující expoziční dávku v daném místě, aby struktura po vyvolání nabyla požadovaného tvaru a hloubky.

Proto byla vyvinuta zjednodušená metoda, která vychází z existujícího modelu pro výpočet PEC a umožňuje přímo stanovit mapu expozičních dávek pro některé

typy mikrostruktur bez nutnosti zdoluhavých výpočtů. Metoda vychází z předpokladu, že průměrná hustota absorbované energie v rezistu dosažená danými expozičními dávkami je pro specifické struktury v ploše konstantní. Specifickými strukturami jsou struktury, které splňují následující předpoklady:

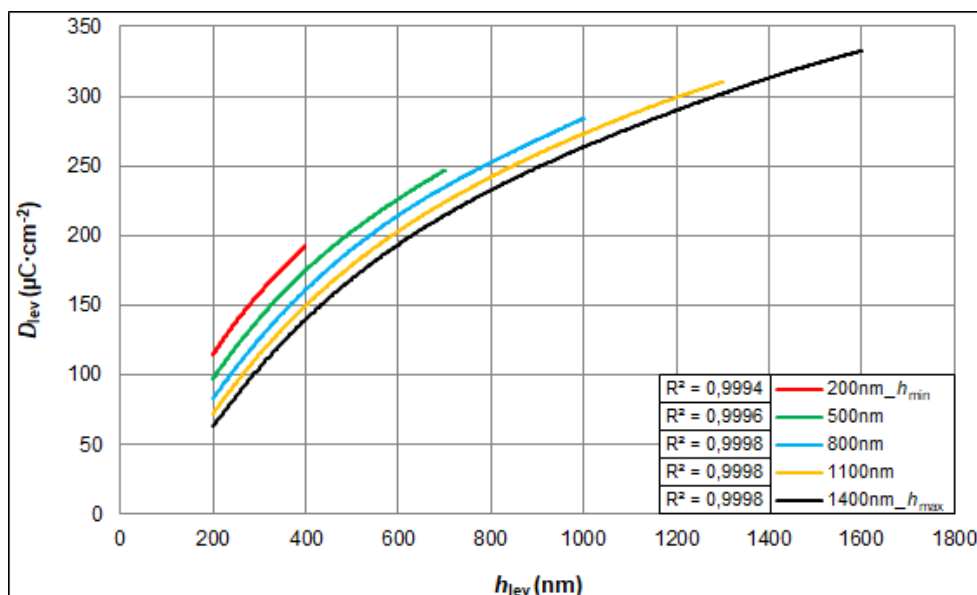
- Perioda struktur je menší než hodnota parametru β pro uvažovanou energii elektronů v primárním svazku a soustavu rezist/substrát model.
- Perioda struktur a laterální rozměr jednotlivých výškových úrovní je vyšší než několikanásobek (alespoň dvou až trojnásobek) hodnoty parametru α pro uvažovanou energii elektronů v primárním svazku a soustavu rezist/substrát model.
- Plocha jednotlivých výškových úrovní je totožná.
- Hloubka struktury je v ploše konstantní.
- Tvar profilu mezi přechodem jednotlivých výškových úrovní nemusí být přísně pravoúhlý.

Tento způsob výpočtu expozičních dávek má smysl uvažovat pouze pro expozice s vyšší energií elektronů v primárním svazku kvůli hodnotě parametru β . Tvar profilu struktur může být libovolný, stejně jako topologie struktury, dokud jsou splněny výše uvedené předpoklady. Přesnost metody se bude snižovat na rozhraní dvou oblastí s jiným typem mikrostruktury, stejně jako na okraji motivu. Druhá nepřesnost se dá vyřešit exponováním okolí motivu takovou dávkou, která zajistí, že průměrná hustota absorbované energie bude v okolí motivu totožná jako uvnitř motivu.

Referenční model výpočtu PEC, který bude použit pro demonstraci principu popisované metody, je součástí softwaru na přípravu expozičních dat GenISys BEAMER. Pro výpočet expozičních dávek využívá rozptylovou funkci pro danou soustavu rezist/substrát a odpovídající křivku citlivosti [13].

Funkčnost metody bude demonstrována na soustavě křemíkového substrátu a rezistu PMMA o tloušťce ~ 2500 nm pro expozice systémem s energií elektronů v primárním svazku 100 keV. Rozsah hloubek, pro který má metoda platit, bude 200–1400 nm. Pro tuto soustavu byly pomocí softwaru GenISys TRACER [14] stanoveny rozptylové parametry β , α a η ve vybraných hloubkách ze zvoleného rozsahu (včetně $h_{\min}$ a $h_{\max}$). Křivka citlivosti použitá pro výpočet expozičních dávek pomocí referenčního modelu pro výpočet PEC je uvedena na obr. 1 (vývojka nAAc).

Na obr. 17 je uvedena aproximace závislosti expoziční dávky na hloubce výškové úrovně (vztažené k povrchu rezistu) pro různé hloubky modelové mikrostruktury (16úrovňová periodická mřížka). Aby referenční model PEC počítal správné expoziční dávky, je nutné exponovat nenulovou expoziční dávkou i první výškovou úroveň, proto je celá mikrostruktura zapuštěná v rezistové vrstvě [15].



Obr. 17 Aproximace závislosti expoziční dávky výškové úrovně na hloubce výškové úrovně pro různé hloubky mikrostruktury s hodnotami spolehlivosti aproximace. Lineární mřížka, perioda 15 μm .

Jednotlivé závislosti z obr. 17 byly aproximovány pomocí polynomu k -tého stupně:

$$D_{\text{lev}} = \sum_{i=0}^k p_i \cdot h_{\text{lev}}^i, \quad (7)$$

kde D_{lev} je expoziční dávka počítané výškové úrovně, h_{lev} je hloubka dané výškové úrovně vztažená k povrchu rezistu, p_i jsou koeficienty polynomu, k je stupeň polynomu.

Pomocí stanovených aproximací se vypočítají expoziční dávky jednotlivých výškových úrovní odpovídající dané hloubce pro danou aproximační funkci. Pro stejné hloubky mikrostruktury se vypočítají expoziční dávky pomocí aproximační funkce stanovené pro hloubku mikrostruktury 1400 nm (maximální uvažovaná hloubka mikrostruktury).

Z takto získaných hodnot se vypočítá průměrný rozdíl expozičních dávek odpovídající dané hloubce mikrostruktury vůči expozičním dávkám vypočítaných

podle aproximační funkce pro maximální uvažovanou hloubku mikrostruktury (1400 nm).

Z průměrných hodnot rozdílů expozičních dávek pro modelové hloubky mikrostruktury byla sestavena závislost korekce expoziční dávky pro všechny výškové úrovně profilu mikrostruktury na celkové hloubce mikrostruktury. Uvedená závislost byla aproximována jako polynom m -tého stupně:

$$D_c = \sum_{i=0}^m q_i \cdot h_{\text{stru}}^i, \quad (8)$$

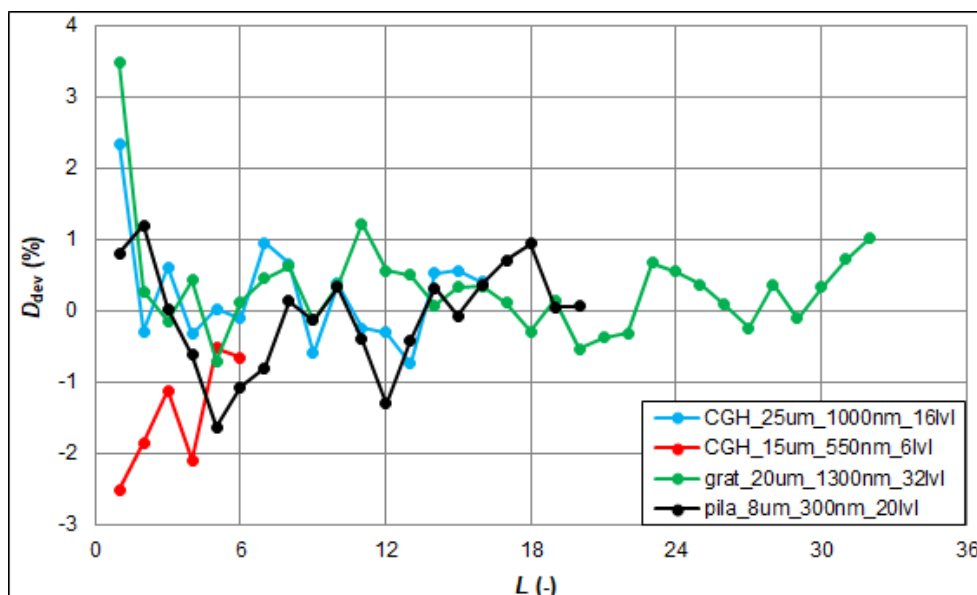
kde D_c je korekce expoziční dávky pro všechny výškové úrovně mikrostruktury, h_{stru} je celková hloubka mikrostruktury, q_i jsou koeficienty polynomu, m je stupeň polynomu. Obecný vztah pro výpočet expoziční dávky pro danou výškovou úroveň aproximační metody je součtem aproximační funkce pro maximální uvažovanou hloubku mikrostruktury a funkce korekce dávky pro danou hloubku mikrostruktury. Pro modelový příklad popsany výše má vztah následující podobu:

$$D_{\text{lev}} = \sum_{i=0}^4 p_i \cdot h_{\text{lev}}^i + \sum_{i=0}^3 q_i \cdot h_{\text{stru}}^i. \quad (9)$$

Hodnoty koeficientů polynomů jsou následující:

$p_0 = -48,3439$; $p_1 = 6,6343 \cdot 10^{-1}$; $p_2 = -5,9508 \cdot 10^{-4}$; $p_3 = 3,0627 \cdot 10^{-7}$; $p_4 = -6,2871 \cdot 10^{-11}$; $q_0 = 69,4001$; $q_1 = -8,9952 \cdot 10^{-2}$; $q_2 = 4,5339 \cdot 10^{-5}$; $q_3 = -1,1794 \cdot 10^{-8}$.

Na obr. 18 je uvedena odchylka expozičních dávek vypočtených aproximační metodou pomocí vztahu 9 vůči expozičním dávkám stanoveným pomocí referenčního modelu pro výpočet PEC pro různé tvary profilů mikrostruktur s různou hloubkou a s různým počtem výškových úrovní.



Obr. 18 Relativní rozdíl expozičních dávek výškových úrovní získaných pomocí aproximační metody pro výpočet expozičních dávek vůči referenčnímu modelu pro výpočet PEC pro různé tvary profilů a hloubek mikrostruktur a různý počet výškových úrovní.

Výpočet expozičních dávek pro testované motivy ukazuje, že většina vypočtených dávek je v rozsahu $\pm 1\%$ od expoziční dávky vypočtené referenčním modelem pro výpočet PEC. S touto přesností byly počítány expoziční dávky pomocí referenčního modelu. Největší rozdíl je pro expoziční dávky prvních výškových úrovní. To je dáno tím, že nejnižší výškové úrovně mají nejmenší expoziční dávku a tím, že absolutní odchylka v rámci všech výškových úrovní je velmi podobná. I přesto se dá předpokládat, že takto malá změna bude mít na výslednou hloubku a tvar mikrostruktury nižší vliv než stabilita nastavení systému během expozice či podmínky během vyvolání. Dále se potvrdilo, že aproximační metodu je možné použít pro různé typy mikrostruktur (periodická mřížka, CGH). Mikrostruktury přitom mohou mít různý tvar profilu (blejzovaný, pila, nepravidelný), různou hloubku i různý počet výškových úrovní.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývala vytvářením velkoplošných DOE pomocí reliéfní elektronové litografie. Cílem práce bylo vyvinout a otestovat metody, které vedou k efektivnější přípravě DOE pomocí této techniky.

Cílem první části bylo navrhnout metodu kombinované reliéfní elektronové litografie, která spojuje expozice pomocí systémů s rozdílnou energií elektronů v primárním svazku do jedné rezistové vrstvy. Metoda spočívá v rozdělení různých typů DOE do expozic pro jednotlivé systémy na základě odlišných interakcí elektronového svazku s různou energií elektronů s rezistem a odlišných vlastností použitých expozičních systémů. Byly navrženy dvě varianty metody, kdy první varianta simultánního vyvolání spočívá ve vyvolání expozice z obou systémů v jednom kroku. Tato varianta klade zvýšené nároky na naladění expozičních dávek obou expozic. Druhá varianta sekvenčního vyvolání umožňuje při vhodné volbě vývojek vyvolat jednotlivé expozice tak, aby se vzájemně neovlivňovaly. Metoda byla otestována pomocí kombinace expozic na systémech BS600 s energií elektronů v primárním svazku 15 keV a EBPG5000+ ES s energií elektronů v primárním svazku 100 keV. Obecně je metoda vhodná pro systémy s nastavitelným urychlovacím napětím primárního svazku elektronů. Případně se dá uvažovat o kombinaci elektronového litografu a elektronového mikroskopu s litografickou nástavbou, kde ovšem tyto systémy nejsou většinou vhodné pro velkoplošné expozice (rychlost zápisu, přesnost a stabilita není srovnatelná s litografickými systémy). Metoda byla publikována v [16].

Druhá část práce se zabývala datovou přípravou expozičních dat pro systémy pracující s Gaussovským svazkem, kde jsou vstupní motivy definovány pomocí obrazového formátu (bitmapa). Cílem bylo zkoumání vlivu optimalizace tvaru hranic exponovaných objektů s rozlišením blížícím se kroku mezi jednotlivými záblesky (*BSS*) na rychlost přípravy expozičních dat, rychlost expozice a na optickou odezvu vytvářených DOE. Ukázalo se, že u většiny typů motivů vede optimalizace hranic objektů k výraznému zrychlení přípravy expozičních dat. Zrychlení je tím větší, čím je topologie motivu složitější a zároveň čím více se rozlišení struktur blíží použitému *BSS*. U některých motivů (periodické mřížky) je zrychlení minimální, a pokud je jejich rozlišení nižší než *BSS*, může vést dokonce ke zpomalení přípravy expozičních dat. Z pohledu vlivu optimalizace na expoziční dobu se dá říct, že ke zrychlení dochází pouze v případě rozlišení vstupních bitmap rovnajících se velikosti *BSS*, případně při použití vysoké míry optimalizace.

V opačných případech dochází spíše k mírnému nárůstu expozičního času. Různá míra optimalizace má i zásadní vliv na optické parametry připravených DOE. Nejvýraznější změna nastává v zesílení účinnosti nultého difrakčního řádu kvůli nedodržení optimální střídy 1:1 optimalizovaných struktur. Ve všech případech testovaných DOE dochází k poklesu účinnosti užitečných difrakčních řádů v závislosti na složitosti topologie motivu a počtu generovaných užitečných difrakčních řádů. Se složitostí topologie se také výrazně snižuje homogenita užitečných difrakčních řádů. Daný způsob optimalizace je tedy vhodnější pro přípravu bezpečnostních hologramů a jednodušších CGH, kde je důležitý celkový obrazový vjem. Metoda byla uvedena závěrečné práce projektu „MPO TRIO FV10618 – Mikro a nano optika pro řízené směřování světla z LED zdrojů“.

Třetí část této práce se zabývala novými přístupy k přípravě hlubokých DOE pomocí reliéfní EBL. Cílem bylo prezentovat postupy jak využít blok litého plexiskla jako náhradu soustavy rezist / substrát. Tento přístup s sebou přináší řadu výhod, především je eliminována problematická příprava hlubokých rezistových vrstev na substrátu. Další výhoda spočívá v tom, že pro všechny typy uvažovaných struktur se stanoví pouze jedna křivka citlivosti (pro danou vývojku a způsob vyvolání). Nevýhodou tohoto způsobu přípravy je nižší čistota plexisklového bloku ve srovnání s rezistovou vrstvou nanesenou na substrátu. Plexisklový blok také nikdy nebude vhodný pro přípravu DOE, kde je vyžadována vysoká planarita jedné nebo obou ploch nosiče, do nějž se motiv připravuje. Dále je nutné využít jiný způsob zápisu pro minimalizaci teplotní zátěže během expozice. Pro tyto účely byla vyvinuta metoda zápisu, která motivy exponuje po vrstvách exponovaných přes sebe, přičemž zároveň zvyšuje homogenitu připravených motivů. Postup přípravy DOE do bloku plexiskla byl publikován v [17]. V rámci této části práce byla dále vyvinuta metoda pro výpočet PEC specifických víceúrovňových struktur. Tato metoda aproximuje existující model pro výpočet PEC a tím tak snižuje čas potřebný ke stanovení expozičních dávek prakticky na nulu. Přesnost metody přímo závisí na přesnosti aproximovaného modelu pro výpočet PEC. Metoda byla implementována do softwaru na přípravu expozičních dat [18].

Vyvinuté metody byly publikovány ve vědeckých periodikách a v konferenčních sbornících. Dále byly popsány jako dílčí výsledky grantových projektů a některé z nich byly implementovány do softwarů na přípravu expozičních dat různých typů DOE. Všechny dosažené výsledky se používají v rámci dalších grantových projektů a smluvního výzkumu.

SEZNAM POUŽITÍ LITERATURY

- [1] KRAATS, A. van de, RAUGHUNATH, M. *Proximity Effect in E-beam Lithography* [online]. [cit. 20-01-2020]. Dostupné z: <<http://nanolithography.gatech.edu/proximity.htm>>.
- [2] DUPAS, C., LAHMANI, M. *Nanoscience: Nanotechnologies and Nanophysics*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007, 823 s. ISBN 3-540-28616-0.
- [3] Vistec Lithography B.V. *Generic Pattern Generator and Format*. Best: Vistec Lithography B.V. 2012. 79 s.
- [4] KOLARIK, V. et al. E-beam Pattern Generator BS600 and Technology Zoom. In *Proceedings of the 4th International Conference NANOCON 2012*. Ostrava: TANGER Ltd., 2012, p. 822-825. ISBN 978-80-87294-32-1.
- [5] KRÁTKÝ, S. et al. Kombinace elektronové litografie s gaussovským svazkem a s proměnným tvarovaným svazkem. *Jemná Mechanika a Optika*. 2015, vol. 60(1), s 10-13. ISBN 0447-6441.
- [6] MELUZÍN, P., HORÁČEK, M., KRÁTKÝ, S. Some Other Gratings: Benchmark for Large-Area E-Beam Nanopatterning. In *Proceedings of the 6th International Conference NANOCON 2014*. Ostrava: TANGER Ltd., 2014. ISBN 978-80-87294-55-0.
- [7] GenISys GmbH. *BEAMER v5.9.0 Manual*. Munich: GenISys GmbH, 2019.
- [8] BRUNN, O., KRÁTKÝ, S., HORÁČEK, M. *Aparatura pro měření difrakční účinnosti a vyzařovací charakteristiky*. Funkční vzorek, 2019.
- [9] PRASCIOLU, M. et al. Fabrication of a three-dimensional optical vortices phase mask for astronomy by means of electron-beam lithography. *Microelectronic Engineering*. 2009, vol. 86, no. 4-6, p. 1103-1106. ISSN 0167-9317.
- [10] SCHIRMER, M. et al. *Conductive top layer for e-beam lithographie for all e-beam resist (Electra 92)*. Strausberg: Allresist GmbH, 2016. 1 s.
- [11] Acces Plastics Limited. *Difference between Cast Acrylic sheet and Extruded Acrylic sheets* [online]. [cit. 11-08-2020]. 2020. Dostupné z <<https://www.accessplastics.com/cast-vs-extruded-acrylic/>>.

- [12] BOLTEN, J. et al. Implementation of Electron Beam Grey Scale Lithography and Proximity Effect Correction for Silicon Nanowire Device Fabrication. *Microelectronic Engineering*. 2011, vol. 88, no. 8, p. 1910-1912. ISSN 0167-9317.
- [13] UNAL, N. et al. Third Dimension of Proximity Effect Correction (PEC). *Microelectronic Engineering*. 2009, vol. 87, no. 5-8, p. 940-942. ISSN 0167-9317.
- [14] GenISys GmbH. *TRACER v2.3.0 Manual*. Munich: GenISys GmbH, 2014.
- [15] KRÁTKÝ, S., URBÁNEK, M., KOLAŘÍK, V. PEC Reliability in 3D E-beam DOE Nanopatterning. *Microscopy and Microanalysis*. 2015, vol. 21, no. S4, p. 230-235. ISSN 1431-9276.
- [16] KRÁTKÝ, S. et al. Combined e-beam lithography using different energies. *Microelectronic Engineering*. 2017, vol. 177, no. SI, p. 30-34. ISSN 0167-9317.
- [17] KRÁTKÝ, S. et al. E-beam grayscale exposures into acrylic-glass plate. In *Proceedings of 42nd International Conference on Micro and Nano Engineering MNE*. Vienna: Mondial. 2016.
- [18] MELUZÍN, P. *Vývoj aplikace na přípravu dat pro elektronový litograf*. Brno: Mendelova Univerzita v Brně, Provozně ekonomická fakulta, 2016. 89 s. Vedoucí diplomové práce Dr. Ing. Radovan Kukla.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje: Stanislav Krátký
Skalice nad Svitavou, č.64, 67901, Skalice nad Svitavou
stanislav.kratky@isibrno.cz
Datum narození: 25.10.1987

Vzdělání:

2012 – dosud Ph.D.
Ústav mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně,
Brno (Česká republika)
Mikroelektronika a technologie
Název závěrečné práce: Kombinovaná elektronová litografie

2010 – 2012 Ing.
Ústav mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně,
Brno (Česká republika)
Elektrotechnická výroba a management
Název závěrečné práce: Technologie leptání křemíku

2007 – 2010 Bc.
Ústav mikroelektroniky, Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně,
Brno (Česká republika)
Mikroelektronika a technologie
Název závěrečné práce: Studium vlastností periodických mřížek
vytvořených elektronovou litografií

Pracovní zkušenosti:

2012 – dosud Doktorand
Ústav přístrojové techniky, AV ČR, v.v.i.

2012 – dosud Výrobní technik
IQS nano s.r.o.

Publikace: 12 recenzovaných článků, 47 konferenčních příspěvků.

- Krátký, S. et al. Combined e-beam lithography using different energies. *Microelectronic Engineering*. 2017, vol. 177, no. SI, p. 30-34.
- Pilát, Z., Kizovský, M., Ježek, J., Krátký, S., Sobota, J., Šiler, M., Samek, O., Buryška, T., Vaňáček, P., Damborský, J., Prokop, Z., Zemánek, P.

Detection of chloroalkanes by surface-enhanced raman spectroscopy in microfluidic chips. *Sensors*. Roč. 18, č. 10 (2018), č. článku 3212.

- Abrams, K.J., Dapor, M., Stehling, N., Azzolini, M., Kyle, S.J., Schäfer, J.S., Quade, A., Mika, F., Krátký, S., Pokorná, Z., Konvalina, I., Mehta, D., Black, K., Rodenburg, C. Making Sense of Complex Carbon and Metal/Carbon Systems by Secondary Electron Hyperspectral Imaging. *Advanced Science*. Roč. 6, č. 19 (2019), č. článku 1900719.

Užité vzory a funkční vzorky: 2 užité vzory, 8 funkčních vzorků.

- 30627 – Difrakční optický variabilní obrazové zařízení.
- 33047 – Bezkontaktní snímač rozptylu světla pro povrchovou diagnostiku.

Spolupráce na projektech: Spoluřešitel 18 grantových projektů.

- MPO TRIO FV10618 – Mikro a nano optika pro řízené směřování světla z LED zdrojů.
- MPO TRIO FV40197 - Návrh a výroba pokročilých difraktivních optických elementů a jejich aplikace do průmyslu.
- MV ČR VI20172020099 - Optovláknové senzory pro měření v jaderných elektrárnách při nadprojektových haváriích.

Spolupráce na smluvním výzkumu: Spoluřešitel 34 projektů smluvního výzkumu v objemu 13.300.000,- Kč.

- SMV-2019-75: Reliéfní mikrostruktury na principu difraktivní optiky.
- SMV-2019-05: Fázové mřížky.
- SMV-2016-02: Lift-off technologie pro metalické mikrostruktury.

ABSTRACT

This thesis deals with grayscale e-beam lithography and diffractive optical elements fabrication. Three topics are addressed. The first topic is combined grayscale e-beam lithography. The goal of this task is combining exposures performed by two systems with various beam energies. This combined technique leads to a better usage of both systems because various structures can be more easily prepared by one electron beam energy than by the other. The next topic is the optimization of shape borders of exposing structures that are defined by image input. The influence of such optimization on exposure data preparation is evaluated, as well as the exposure time and the change of optical properties of testing structures. The possibility of deep multilevel diffractive optical element fabrication in plexiglass blocks is researched as the third topic. Plexiglass can replace the system of a resist and a substrate. A new approach to writing down the structures by electron beam is presented, minimizing thermal stress on the plexiglass block during the exposure. The writing method also improves the homogeneity of exposed motifs. A method for computing the exposure dose for specific multilevel structures was designed. This method is based on the existing model of proximity effect computation and it minimizes the computing time necessary to obtain the exposure doses.