



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

Abstrakt:

Tato práce se zabývá reliéfní elektronovou litografií a přípravou difrakčních optických elementů. Řešena jsou tři témata. Prvním tématem je reliéfní kombinovaná elektronová litografie, kde je cílem zkombinovat expozice dvou systémů s rozdílnou energií elektronů primárního svazku. Kombinovaná technika vede k efektivnějšímu využití jednotlivých systémů, kdy se různé struktury lépe připravují jinými energiemi elektronů v primárním svazku. Dalším tématem je optimalizace hranic objektů exponovaných struktur, které jsou definovány obrazovými vstupy. Zkoumá se vliv této optimalizace na rychlost přípravy expozičních dat, na dobu expozice a na optickou odezvu testovaných struktur. Třetím tématem je zkoumání možností přípravy hlubokých víceúrovňových difrakčních optických elementů do bloků plexiskla, jako náhrada soustavy rezist/substrát. S tím se pojí nový způsob zápisu, který minimalizuje teplotní zátěž na plexisklo během expozice elektronovým svazkem a zároveň zvyšuje homogenitu výsledného motivu. V této části byla dále navržena metoda výpočtu expozičních dávek specifických víceúrovňových struktur vycházející z existujících modelů pro výpočet korekcí jevu blízkosti, která minimalizuje čas výpočtu expozičních dávek.

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.

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, optimization of data preparation, proximity effect, PMMA, plexiglass.

Bibliografická citace díla:

KRÁTKÝ, S. *Kombinovaná elektronová litografie*. Brno, 2020. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Vladimír Kolařík.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem svoji dizertační práci na téma Kombinovaná elektronová litografie vypracoval samostatně pod vedením vedoucího dizertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou v práci citovány a kompletně uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25. 9. 2020

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu dizertační práce doc. Ing. Vladimíru Kolaříkovi, Ph.D. za odbornou pomoc především z oblasti difrakční optiky a další cenné rady při zpracování mé práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům skupiny elektronové litografie na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Jmenovitě pak Ing. Miroslavu Horáčkovi, Ph.D. za neotřelé náhledy na řešenou problematiku, Ing. Milanu Matějkovi, Ph.D. za to, že mě přivedl k elektronové litografii, Stanislavu Královi za jeho ochotu při pomoci s řešením praktických problémů, Ing. Petru Meluzínovi za softwarovou podporu a Bc. Janě Chlumské za podporu v oblasti chemie. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Tomáši Halasovi za jazykovou korekci práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svojí ženě Lucii Krátké za to, že mě stále hnala kupředu, i když to s dokončením práce nevypadalo příliš nadějně.

V Brně dne 25. 9. 2020

.....

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	12
ÚVOD	14
1 DOSAVADNÍ VÝVOJ	16
1.1 SMĚRY VÝVOJE ELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE	16
1.1.1 Systémy s tvarovaným svazkem.....	16
1.1.2 Vícesvazkové systémy	17
1.1.3 Vývoj systémů využívajících pomalé elektrony.....	17
1.1.4 Vývoj chemicky zesílených rezistů	18
1.2 KOMBINOVANÁ LITOGRAFIE	19
1.2.1 Mix & Match litografie.....	20
1.2.2 Hybridní litografie.....	20
1.3 RELIÉFNÍ LITOGRAFIE	21
1.3.1 Energie elektronů primárního svazku.....	22
1.3.2 Proximity efekt.....	24
1.3.3 Rezistové procesy.....	26
1.4 ELEKTRONOVÉ LITOGRAFY TESLA BS600 A RAITH EBPG5000+ ES	29
1.5 DIFRAKČNÍ OPTICKÉ ELEMENTY	31
2 CÍLE DIZERTACE.....	36
3 VLASTNÍ PRÁCE A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	38
3.1 METODA KOMBINOVANÉ ELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE.....	38
3.1.1 Fyzikální a materiálové předpoklady metody.....	38
3.1.2 Vhodnost jednotlivých expozičních systémů pro různé typy DOE v závislosti na systémových parametrech.....	43
3.1.3 Metoda kombinace expozic pomocí dvou systémů	50
3.1.4 Diskuze	54

3.2	OPTIMALIZACE PŘÍPRAVY EXPOZIČNÍCH DAT PRO BINÁRNÍ STRUKTURY	
	MODIFIKACÍ HRANIC OBJEKTŮ VSTUPNÍCH DAT.....	55
3.2.1	<i>Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na rychlost přípravy expozičních dat a na dobu expozice</i>	56
3.2.2	<i>Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na výslednou optickou odezvu různých typů DOE</i>	63
3.2.3	<i>Diskuze</i>	72
3.3	OPTIMALIZACE PŘÍPRAVY VÍCEÚROVŇOVÝCH STRUKTUR DO TLUSTÝCH VRSTEV	
	REZISTU	74
3.3.1	<i>Nové přístupy k přípravě hlubokých DOE.....</i>	74
3.3.2	<i>Metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí.....</i>	83
3.3.3	<i>Aproximační metoda výpočtu expozičních dávek specifických víceúrovňových struktur</i>	93
3.3.4	<i>Diskuze</i>	101
	ZÁVĚR	103
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	106
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	118
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ.....	119
	SEZNAM PŘÍLOH	121

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1 PROCES MIX & MATCH LITOGRAFIE. NANESENÍ ELEKTRONOVÉHO REZISTU (A), EXPOZICE ELEKTRONOVÝM SVAZKEM (B), VYVOLÁNÍ ELEKTRONOVÉHO REZISTU (C), NANESENÍ UV REZISTU (D), EXPOZICE UV ZÁŘENÍM (E), VYVOLÁNÍ UV REZISTU (F).....	20
OBR. 2 PROCES HYBRIDNÍ LITOGRAFIE. NANESENÍ REZISTU (A), EXPOZICE ELEKTRONOVÝM SVAZKEM (B), EXPOZICE UV SVĚTLEM (C), VYVOLÁNÍ REZISTU (D).	21
OBR. 3 PROCES RELIÉFNÍ ELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE. NANESENÍ REZISTU (A), EXPOZICE ELEKTRONOVÝM SVAZKEM RŮZNÝMI LOKÁLNÍMI DÁVKAMI (B), VYVOLÁNÍ REZISTU (C).	21
OBR. 4 ZÁVISLOST DOLETU ELEKTRONŮ NA JEJICH ENERGII PRO RŮZNÉ REZISTY.....	22
OBR. 5 ZÁVISLOST HUSTOTY ABSORBOVANÉ ENERGIE NA PENETRAČNÍ HLOUBCE PRO ENERGIE ELEKTRONŮ PRIMÁRNÍHO SVAZKU 15 KEV A 100 KEV V REZISTU PMMA PRO RŮZNÉ EXPOZIČNÍ DÁVKY.....	23
OBR. 6 ZÁVISLOST HUSTOTY ABSORBOVANÉ ENERGIE V OBJEMU REZISTU (PMMA NA SI SUBSTRÁTU) NA VZDÁLENOSTI OD MÍSTA DOPADU BODOVÉHO SVAZKU PRO TLOUŠTKY REZISTU 0,2 μ M, 2 μ M A 10 μ M A PRO ENERGIE ELEKTRONŮ V PRIMÁRNÍM SVAZKU 15 KEV (VLEVO) A 100 KEV (VPRAVO).....	25
OBR. 7 SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ MAKROMOLEKULY PMMA REZISTU A NAZNAČENÍ JEJÍHO ROZPADU PŮSOBENÍM ELEKTRONOVÉHO ZÁŘENÍ. <i>B</i> -ELIMINACE A ODSTRANĚNÍ ESTEROVÉ SKUPINY (A). ROZPAD POLYMERNÍHO ŘETĚZCE ZA VZNIKU ESTEROVÉ SKUPINY (B, I) NEBO PŘÍMÝ PROCES (B, II).....	27
OBR. 8 KŘIVKA CITLIVOSTI PRO POZITIVNÍ REZIST.	28
OBR. 9 PŘÍKLADY FUNKCE RŮZNÝCH TYPŮ DOE. TVAROVACÍ PROFILU SVAZKU (A), DĚLIČ SVAZKU (B), FOKUSAČNÍ PRVEK (C).	31
OBR. 10 PRINCIP ALGORITMU IFTA PRO PŘÍPRAVU DOE.	33
OBR. 11 PŘÍKLADY RŮZNÝCH TYPŮ DOE Z HLEDISKA TOPOLOGIE. LINEÁRNÍ PERIODICKÁ MŘÍŽKA (A), DOE SLOŽENÉ ZE SEGMENTŮ LINEÁRNÍCH MŘÍŽEK (B), ZONÁLNÍ ČOČKA (C), CGH (D).	34
OBR. 12 PROFIL MIKROSTRUKTURY DOE. BINÁRNÍ (A), HARMONICKÝ (B), PILA (C), BLEJZOVANÝ (D), OBECNÝ VÍCEÚROVNŮVÝ (E).	35

OBR. 13 BINÁRNÍ STRUKTURA EXPONOVANÁ POMOCÍ ENERGIE ELEKTRONŮ V PRIMÁRNÍM SVAZKU 15 KEV (NAHOŘE) A 100 KEV (DOLE) PRO STEJNÝ PROCES (SUBSTRÁT, REZIST, VYVOLÁNÍ). PROFIL STRUKTURY (VLEVO), HISTOGRAM PROFILU (VPRAVO). MĚŘENO POMOCÍ AFM.	39
OBR. 14 KŘIVKY CITLIVOSTI PRO REZIST PMMA 350K, HLOUBKA 2500 NM, SUBSTRÁT Si, DOBA VYVOLÁNÍ 6 MIN, TEPLOTA LÁZNĚ 21,5 °C, EXPOZICE S ENERGIEMI ELEKTRONŮ V PRIMÁRNÍM SVAZKU 15 KEV A 100 KEV.	41
OBR. 15 SROVNÁNÍ RYCHLOSTI EXPOZICE SYSTÉMŮ BS600 A EBPG5000+ ES PRO RŮZNÉ TYPY MOTIVŮ.	46
OBR. 16 NEJMENŠÍ SAMOSTATNÁ LINKA VYTVOŘENÁ V REZISTU PMMA O TLOUŠŤCE 50 NM POMOCÍ SYSTÉMU BS600 (A), EBPG5000+ ES (B) A NEJMENŠÍ ČITELNÝ TEXT VYTVOŘENÝ V REZISTU PMMA O TLOUŠŤCE 2500 NM (HLOUBKA STRUKTURY ~50 NM) POMOCÍ SYSTÉMU EBPG5000+ ES (C).....	48
OBR. 17 SROVNÁNÍ ROZEZNATELNOSTI EXPOZIČNÍCH POLÍ RŮZNÝCH VELIKOSTÍ PRO SYSTÉMY EBPG5000+ ES A BS600. MOTIVY – LINEÁRNÍ PERIODICKÁ MŘÍŽKA, DVOUÚROVŇOVÉ CGH A OSMIÚROVŇOVÉ CGH.	50
OBR. 18 METODA KOMBINOVANÉ ELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE PRO SIMULTÁNNÍ VYVOLÁNÍ MOTIVŮ (A) A SEKVENČNÍ VYVOLÁNÍ MOTIVŮ (B).	51
OBR. 19 GRAFICKÝ DESIGN MOTIVU DEMONSTRUJÍCÍHO MOŽNOSTI METODY KOMBINOVANÉ ELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE.....	53
OBR. 20 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.	54
OBR. 21 DETAIL ČÁSTI VYBRANÝCH VSTUPNÍCH BITMAP ($3 \times 3 \mu\text{m}^2$), ROZLIŠENÍ 1 PX = 50 NM, A) BS-2, B) BS-6, C) CGH-40°, D) CGH-60°.	57
OBR. 22 DETAIL IMPORTOVANÉ BITMAPY ($3 \times 3 \mu\text{m}^2$) PO ODSTRANĚNÍ VNITŘNÍCH HRANIC MEZI JEDNOTLIVÝMI PIXELY PRO RŮZNÁ ROZLIŠENÍ. MOTIV CGH-60°.	58
OBR. 23 ZNÁZORNĚNÍ ALGORITMU MODIFIKUJÍCÍHO HRANICE OBJEKTŮ APLIKOVANÉHO NA VSTUPNÍ BITMAPY.	58

OBR. 24	VÝSLEDEK OPTIMALIZACE VYBRANÝCH VSTUPNÍCH BITMAP S ROZLIŠENÍM 1 PX = 50 NM PRO RŮZNÉ HODNOTY <i>LST</i> . MOTIV <i>CGH-60°</i>	59
OBR. 25	VNITŘNÍ STRUKTURA EXPOZIČNÍCH DAT PO APLIKACI RŮZNÉ MÍRY OPTIMALIZACE NA VSTUPNÍ BITMAPU S ROZLIŠENÍM 1 PX = 50 NM. MOTIV <i>CGH-60°</i>	60
OBR. 26	SROVNÁNÍ DOBY PŘÍPRAVY EXPOZIČNÍCH DAT PRO RŮZNÁ VSTUPNÍ ROZLIŠENÍ A RŮZNOU MÍRU OPTIMALIZACE. MOTIV <i>COMBO</i>	60
OBR. 27	SROVNÁNÍ DOBY PŘÍPRAVY EXPOZIČNÍCH DAT PRO VSTUPNÍ ROZLIŠENÍ BITMAP 1 PX = 50 NM A RŮZNOU MÍRU OPTIMALIZACE PRO RŮZNÉ TYPY MOTIVŮ.....	61
OBR. 28	SROVNÁNÍ EXPOZIČNÍ DOBY MOTIVU S RŮZNÝM ROZLIŠENÍM VSTUPNÍCH BITMAP A RŮZNOU MÍROU OPTIMALIZACE. MOTIV <i>COMBO</i>	62
OBR. 29	SIGNÁL POUŽITÝ PRO VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH MIKROSTRUKTUR (OBRAZŮ) POMOCÍ METODY IFTA. <i>BS-2</i> (A), <i>BS-6</i> (B), <i>CGH-40°</i> (C), <i>CGH-60°</i> (D).....	63
OBR. 30	SCHÉMA ALGORITMU REKONSTRUKCE SIGNÁLU Z FÁZOVÉ SLOŽKY OBRAZU POMOCÍ <i>2D-FFT</i>	63
OBR. 31	SROVNÁNÍ TOPOLOGIE EXPOZIČNÍCH DAT (A) SE SKUTEČNOU TOPOLOGIÍ JEDNOTLIVÝCH ZÁBLESKŮ (B), S VÝSLEDKEM SKUTEČNÉ EXPOZICE (C), SNÍMEK SEM, VELIKOST VÝŘEZU 1,60×1,35 μm ² . MOTIV <i>CGH-60°</i> , VSTUPNÍ ROZLIŠENÍ BITMAP 1 PX = 50 NM, <i>LST</i> = 150 NM.	64
OBR. 32	SROVNÁNÍ TEORETICKÝCH INTENZITNÍCH MAP – SIGNÁLU (NAHOŘE) SE SNÍMKY REKONSTRUOVANÝCH SIGNÁLŮ SKUTEČNĚ EXPOZOVANÝCH STRUKTUR (DOLE) MOTIVU <i>CGH-40°</i> PRO RŮZNOU MÍRU OPTIMALIZACE A ROZLIŠENÍ VSTUPNÍCH BITMAP 1 PX = 50 NM.	70
OBR. 33	TOPOLOGIE MOTIVU <i>FRAKT</i> PODLE VELIKOSTI PERIOD STRUKTUR VE VZTAHU K ROZLIŠENÍ VSTUPNÍCH BITMAP.	71
OBR. 34	SNÍMKY MOTIVU <i>FRAKT</i> POD STEJNÝM ÚHLEM NASVÍCENÍ PRO ROZLIŠENÍ VSTUPNÍCH BITMAP 1 PX = 50 NM PRO RŮZNOU MÍRU OPTIMALIZACE.	71
OBR. 35	PRASKÁNÍ TLUSTÝCH VRSTEV REZISTU PRO DELŠÍ ČASY VYVOLÁNÍ. TEST PLOŠNÉ CITLIVOSTI PRO REZIST PMMA, TLOUŠŤKA ~10 μm, SI SUBSTRÁT, VÝVOJKA NAAc, ČAS VYVOLÁNÍ 2 MIN (A), 6 MIN (B).....	76
OBR. 36	ZÁVISLOST HUSTOTY ABSORBOVANÉ ENERGIE V OBJEMU REZISTU (PMMA NA SI SUBSTRÁTU – VLEVO, BLOK PLEXISKLA – VPRAVO) NA VZDÁLENOSTI OD MÍSTA	

DOPADU BODOVÉHO SVAZKU PRO TLOUŠŤKU REZISTU 10 μm A ENERGIE ELEKTRONŮ V PRIMÁRNÍM SVAZKU 100 keV.....	77
OBR. 37 SROVNÁNÍ ROVINNOSTI BLOKU PLEXISKLA (VPRAVO), ČISTÉHO KŘEMÍKOVÉHO SUBSTRÁTU (VLEVO) A 10 μm TLUSTÉ VRSTVY REZISTU PMMA NA KŘEMÍKOVÉM SUBSTRÁTU (UPROSTŘED, NANESENO ODSŤŘEDIVÝM LITÍM). MĚŘENO POMOCÍ INTERFEROMETRU V SYSTÉMU EBP5000+ ES.....	78
OBR. 38 DEFEKT BLOKU REZISTU ZPŮSOBENÝ NEDOSTATEČNÝM ZVODIVĚNÍM BLOKU REZISTU (A), NEVHODNÝM PROCESEM POKOVENÍ (B) A EXPOZICÍ PŘÍLIŠ VYSOKOU DÁVKOU (C).....	79
OBR. 39 DEFEKTY NA OKRAJI BLOKU EXTRUDOVANÉHO PLEXISKLA VZNIKLÉ PROCESEM VYVOLÁNÍ (A). DEFEKTY VYSKYTUJÍCÍ SE PO CELÉM POVRCHU EXTRUDOVANÉHO PLEXISKLA PŮSOBNÍM VÝVOJKY NA VZORKY STARÉ NĚKOLIK MĚSÍCŮ (B).....	80
OBR. 40 KŘIVKY CITLIVOSTI PRO REZIST PMMA 350K (TLOUŠŤKA 10000 NM, SUBSTRÁT SI) A BLOK LITÉHO PLEXISKLA, DOBA VYVOLÁNÍ 6 MIN, TEPLOTA LÁZNĚ 21,5 °C, ENERGIE ELEKTRONŮ V PRIMÁRNÍM SVAZKU 100 keV.....	81
OBR. 41 SNÍMKY TESTOVACÍHO MOTIVU POD RŮZNÝM ÚHLEM NASVÍCENÍ, EXPOZICE DO BLOKU LITÉHO PLEXISKLA SYSTÉMEM EBP5000+ ES. SNÍMKY ZE SEM SROVNÁVAJÍCÍ STEJNÝ TYP MIKROSTRUKTURY (DVOUÚROVŇOVÁ MŘÍŽKA S PERIODOU 1,2 μm – VLEVO, DVOUÚROVŇOVÁ MŘÍŽKA S PERIODOU 400 NM – UPROSTŘED, 8ÚROVŇOVÉ CGH – VPRAVO) EXPONOVANÝ DO LITÉHO PLEXISKLA A DO REZISTU PMMA NA KŘEMÍKOVÉM SUBSTRÁTU.....	82
OBR. 42 SROVNÁNÍ STANDARDNÍHO ZÁPISU VÍCEÚROVŇOVÝCH STRUKTUR (A) A FRÉZOVANÉHO ZÁPISU (B).....	83
OBR. 43 SROVNÁNÍ TOPOLOGIE UMÍSTĚNÍ EXPOZIČNÍCH POLÍ. STANDARDNÍ ZPŮSOB ZÁPISU (A), ČTYŘNÁSOBNÝ PŘEBĚH (B), METODA FRÉZOVANÉHO ZÁPISU S KVAZI-NEPRAVIDELNĚ UMÍSTĚNÝMI EXPOZIČNÍMI POLI (C).....	84
OBR. 44 KŘIVKY CITLIVOSTI PRO BLOK LITÉHO PLEXISKLA PRO STANDARDNÍ A FRÉZOVANÝ ZPŮSOB ZÁPISU, DOBA VYVOLÁNÍ 6 MIN, TEPLOTA LÁZNĚ 21,5 °C, ENERGIE ELEKTRONŮ V PRIMÁRNÍM SVAZKU 100 keV.....	86
OBR. 45 PŘESNOST SESAZENÍ JEDNOTLIVÝCH VRSTEV (ČTYŘI VRSTVY) PRO METODU FRÉZOVANÉHO ZÁPISU S KVAZI-NEPRAVIDELNĚ UMÍSTĚNÝMI EXPOZIČNÍMI POLI PRO	

MŘÍŽKY S RŮZNOU PERIODOU (HORIZONTÁLNÍ POPIS SNÍMKŮ), ORIENTACÍ A POZICÍ NA SUBSTRÁTU (VERTIKÁLNÍ POPIS SNÍMKŮ). SNÍMEK ZE SEM.....	88
OBR. 46 PŘESNOST SOUKRYTU JEDNOTLIVÝCH VRSTEV JAKO ZÁVISLOST ZMĚNY EXPONOVANÉ ČÁSTI MŘÍŽKY S NEJMENŠÍ ROZLIŠITELNOU PERIODOU VŮČI STANDARDNÍMU ZPŮSOBU EXPOZICE NA POČTU EXPONOVANÝCH VRSTEV (L_{COUNT}) A POZICI MOTIVU NA SUBSTRÁTU (P), HORIZONTÁLNÍ SMĚR LINEK MŘÍŽKY.	89
OBR. 47 SROVNÁNÍ ČASOVÉ NÁROČNOSTI PŘÍPRAVY EXPOZIČNÍCH DAT PRO RŮZNÉ METODY ZÁPISU EXPONOVANÉHO MOTIVU. DOBA PŘÍPRAVY JE NORMOVÁNA NA 1 cm^2 MOTIVU. L OZNAČUJE MOTIV FRESNELOVY ČOČKY A B OZNAČUJE ACHROMATICKOU STRUKTURU.	90
OBR. 48 SROVNÁNÍ EXPOZIČNÍ DOBY MOTIVŮ L (FRESNELOVA ČOČKA) A B (ACHROMATICKÁ STRUKTURA) PRO RŮZNÉ METODY ZÁPISU MOTIVŮ.	91
OBR. 49 SROVNÁNÍ HOMOGENITY MOTIVU FRESNELOVA ČOČKA PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY ZÁPISU. SNÍMKY Z OPTICKÉHO MIKROSKOPU.	92
OBR. 50 ZÁVISLOST EXPOZIČNÍ DÁVKY VÝŠKOVÉ ÚROVNĚ NA HLOUBCE VÝŠKOVÉ ÚROVNĚ PRO RŮZNÉ HLOUBKY MIKROSTRUKTURY. LINEÁRNÍ MŘÍŽKA, PERIODA $15 \mu\text{m}$, 16 VÝŠKOVÝCH ÚROVNÍ.	96
OBR. 51 APROXIMACE ZÁVISLOSTÍ EXPOZIČNÍ DÁVKY VÝŠKOVÉ ÚROVNĚ NA HLOUBCE VÝŠKOVÉ ÚROVNĚ PRO RŮZNÉ HLOUBKY MIKROSTRUKTURY S HODNOTAMI SPOLEHLIVOSTI APROXIMACE. LINEÁRNÍ MŘÍŽKA, PERIODA $15 \mu\text{m}$	97
OBR. 52 ZÁVISLOST KOREKCE EXPOZIČNÍ DÁVKY PRO VÝŠKOVÉ ÚROVNĚ NA CELKOVÉ HLOUBCE MIKROSTRUKTURY PRO APROXIMAČNÍ MODEL PEC.	99
OBR. 53 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.	100

SEZNAM TABULEK

TAB. 1 PARAMETRY PROXIMITY EFEKTU PRO RŮZNÉ TLOUŠTKY REZISTU PMMA NA KŘEMÍKOVÉM SUBSTRÁTU U DNA REZISTU (ROZHRANÍ SUBSTRÁT / REZIST).....	26
TAB. 2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY LITOGRAFU TESLA BS 600 A RAITH EBPG 5000+ ES [73][74].....	30
TAB. 3 KONTRAST A CITLIVOSTI REZISTU PMMA PRO VÝVOJKY IPA+H ₂ O, MIBK+IPA A NAAC PRO EXPOZICE S ENERGÍÍ ELEKTRONŮ V PRIMÁRNÍM SVAZKU 15 KEV A 100 KEV.....	42
TAB. 4 VÝSLEDKY TESTU SEKVENČNÍHO VYVOLÁNÍ PRO SYSTÉM S ENERGÍÍ ELEKTRONŮ V PRIMÁRNÍM SVAZKU 15 KEV A 100 KEV.	52
TAB. 5 SROVNÁNÍ TEORETICKÝCH HODNOT PARAMETRŮ H_{EF} , H , H_0 , H_S A H_{S-EF} PRO RŮZNÉ MOTIVY A RŮZNÉ ÚROVNĚ OPTIMALIZACE PRO ROZLIŠENÍ VSTUPNÍCH BITMAP 1 PX = 50 NM.....	65
TAB. 6 TEORETICKÉ HODNOTY ÚČINNOSTÍ UŽITEČNÝCH DIFRAKČNÍCH ŘÁDŮ PRO MOTIVY BS-2 A BS-6 PRO RŮZNOU MÍRU OPTIMALIZACE A ROZLIŠENÍ VSTUPNÍCH BITMAP 1 PX = 50 NM.....	66
TAB. 7 SROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PARAMETRŮ H_{EF} , H , H_0 , H_S , H_{S-EF} PRO MOTIVY BS-2 A BS-6 PRO RŮZNOU MÍRU OPTIMALIZACE A PRO ROZLIŠENÍ VSTUPNÍCH BITMAP 1 PX = 50 NM.....	68
TAB. 8 NAMĚŘENÉ HODNOTY ÚČINNOSTÍ UŽITEČNÝCH DIFRAKČNÍCH ŘÁDŮ PRO MOTIVY BS-2 A BS-6 PRO RŮZNOU MÍRU OPTIMALIZACE A ROZLIŠENÍ VSTUPNÍCH BITMAP 1 PX = 50 NM.....	68
TAB. 9 HODNOTY PARAMETRŮ A , B A H PRO RŮZNÉ TLOUŠTKY REZISTU PMMA NA KŘEMÍKOVÉM SUBSTRÁTU V TOTOŽNÝCH VÝŠKOVÝCH HLADINÁCH REZISTU VZTAŽENÝCH K POVRCHU REZISTU.....	75
TAB. 10 EXPOZIČNÍ DÁVKY PRO STRUKTURU LINEÁRNÍ MŘÍŽKY S PERIODOU 15 μ M A HLOUBKOU STRUKTURY 200 NM, 16 VÝŠKOVÝCH ÚROVNÍ, ZÍSKANÉ Z APROXIMAČNÍCH FUNKCÍ PRO HLOUBKY MIKROSTRUKTURY 200 NM A 1400 NM.	98

ÚVOD

Elektronová litografie (EBL – z anglického *electron beam lithography*) využívající přímého zápisu svazkem elektronů (expozice) do citlivého materiálu (rezist) patří mezi nejpoužívanější metody pro přípravu mikro a nano-struktur [1]. Tato metoda vznikla kvůli nedostačujícímu rozlišení optické (UV) litografie [1][2]. Vývoj stále pokračuje, jak na straně zařízení (elektronový litograf), tak na straně technologického procesu (nové rezisty, způsoby expozice, vyvolání motivu apod.) [2][3].

Velkou výhodou této techniky je možnost přímého zápisu motivu ve velmi vysokém rozlišení bez použití masek. Tato výhoda je zároveň i nevýhodou, protože kvůli expozici bod po bodu, případně po velmi malých částech motivu, je celá expozice časově náročná. Zvyšování rychlosti expozice je proto hlavním předmětem výzkumu a vývoje v oblasti elektronové litografie a přímo souvisí s aspekty uvedenými výše. Základní posun ve zvyšování rychlosti expozice je dán vývojem nových elektronových systémů pro přímý zápis. Především jde o systémy s tvarovaným svazkem a také multi svazkové systémy, které exponují několik částí motivu najednou [4][5][6]. Další možností jak zvýšit rychlost expozice daného motivu je kombinace elektronové a UV litografie (tzv. Mix & Match proces), kdy části motivu, které nevyžadují velmi vysoké rozlišení, se exponují pomocí UV litografie, a tím se sníží celková časová náročnost expozice motivu [7]. S tím také souvisí vývoj nových rezistových materiálů, které se dají použít jak v elektronové, tak v optické litografii. Všechny výše uvedené postupy pro zvýšení rychlosti se týkají především binární litografie pro tvorbu fotomasek používaných pro výrobu polovodičových součástek, což je stále hlavní odvětví, kde se elektronová litografie využívá. U prvků, které mají složitější víceúrovňovou strukturu (například difrakční optické elementy – DOE), však kombinace elektronové a optické litografie nemusí být dostačující. Je to dáno především tím, že každý systém (ať už pro elektronovou nebo optickou litografii) má svá omezení a limity, které ho předurčují pro použití v dané oblasti zájmu. U elektronových litografů jde převážně o parametry jako je energie elektronů v primárním svazku (z něj pramenící rozptylové parametry pro interakci elektronů s látkou), charakter svazku elektronů (Gaussovský, tvarovaný) a způsob zápisu různých motivů.

Tato práce se zabývá reliéfní elektronovou litografií a přípravou DOE, což jsou planární mikrostruktury interagující se světlem. Jejich hloubka je v rozmezí 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 EBL, 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 pomocí systémů pracujících s 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 mohou 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 rozdílné chování elektronů pro různé tloušťky rezistu, případně pro různé kombinace materiálů substrátu a rezistu. Rovněž je problematické nanášení tlustých vrstev na nosné substráty. Expozice přímo do bloku plexiskla by mohla některé výše zmíněné obtíže eliminovat. Cílem je navrhnout postupy, které se dají aplikovat na expozice DOE do tohoto typu materiálu. Dále byla navržena metoda 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 DOSAVADNÍ VÝVOJ

1.1 Směry vývoje elektronové litografie

Již delší dobu není v elektronové litografii dosažení vyššího rozlišení tím hlavním cílem vývoje. Velikost stopy svazku (v dnešní době jsou jednotky nanometrů standardem pro většinu elektronových systémů) při dopadu na substrát již není určujícím faktorem pro dosažené rozlišení [8][9][10][11]. Hlavním faktorem jsou především vlastnosti použitého rezistového materiálu a energie elektronů primárního svazku. Vývoj je tedy převážně zaměřen na zvýšení rychlosti expozic (výtěžnosti), aby tak elektronová litografie mohla soupeřit s jinými technikami, které sice nemusí dosahovat tak vysokého rozlišení, nicméně svojí rychlostí expozice dalece přesahují momentální možnosti elektronové litografie [12]. Dalším trendem v elektronové litografii je využívání stále nižší energie elektronů v primárním svazku (5 keV a méně), což může být výhodné pro přípravu fotomasek [13]. Nicméně pro přípravu komplexních motivů obsahujících různé typy DOE nejsou tyto trendy příliš využitelné.

1.1.1 Systémy s tvarovaným svazkem

V polovodičovém průmyslu, což je stále hlavní hnací motor vývoje v elektronové litografii, se používají výhradně systémy s tvarovaným svazkem. Na rozdíl od systémů s Gaussovským svazkem se vyznačují vyšší rychlostí zápisu díky proměnlivému tvaru elementární expozice, což je pro přípravu velkého množství foto-masek nezbytné [6]. Další výhodou tohoto systému je homogenita proudové hustoty v celém průřezu elementární expozice, kdy se pomocí tvarovacích clon ořízne požadovaná část svazku primárních elektronů, který má standardně Gaussovský charakter [14]. Tvarovací clony nemusí mít jen proměnlivé rozměry rektangulárního tvaru, ale mohou mít prakticky libovolný tvar. Existují i systémy s programovatelným polem tvarovacích clon. Takový systém potom může exponovat různé tvary jako jednu elementární expozici nebo se clony natvarují tak, aby systém exponoval více míst se stejnými nebo různými tvary zároveň [15].

1.1.2 Vícesvazkové systémy

Dalším způsobem, jak se dá dosáhnout zvýšení expoziční rychlosti, je exponování více míst současně. Toho využívá koncept vícesvazkových systémů (*MBS – multibeam system*). Tyto systémy jsou zatím experimentální a nevyužívají se pro hromadnou výrobu. Existuje několik typů takovýchto systémů. Jedny z nich pracují na principu pole elektronových zdrojů, které paralelně exponují stejný motiv, a to především v režimu „za letu“ (*on-fly*), kdy jsou jednotlivé svazky ve stacionární pozici a pohybem stolu, na kterém je umístěn substrát, se zapisuje požadovaný motiv [4][16]. Dalším typem jsou systémy s více nezávislými tubusy, kde každý může exponovat jiný motiv. Rychlost expozice se sice nezvýší tak markantně jako v předchozím případě, ale výhodou je nezávislost jednotlivých svazků [17]. Nejrozšířenější možností jsou pak systémy, které primární svazek pomocí programovatelných clon rozdělí do více svazků [18]. Tyto systémy se vyznačují velmi výrazným navýšením expoziční rychlosti pro přípravu fotomasek, nicméně pro tvorbu složitých DOE nejsou vhodné kvůli nepravidelnosti topologie v rámci celého motivu.

Možnost exponovat každým zdrojem/svazkem jiný motiv je momentálně nerealná z hlediska řídicí elektroniky vzhledem k tomu, že tyto systémy pracují s tisíci až desítkami svazků zároveň [19]. Takový počet svazků stále nemůže konkurovat např. projekční optické litografii, ale už může být výhodnější pro malosériovou výrobu, protože pořízení takového systému může být cenově srovnatelné s pořízením sady masek pro polovodičovou výrobu. Aby takovéto systémy mohly v rychlosti zápisu plně konkurovat projekční optické litografii, musel by se počet paralelních svazků zvýšit na několik milionů. Dalším problémem je celkový proud, který by musel výchozí elektronový zdroj poskytnout pro zaručení expozice požadovanou dávkou v co nejkratším čase [18]. V současnosti se pracuje i na vícesvazkových systémech s tvarovaným svazkem (*MSBS – multi-shaped-beam system*), který by kombinoval zároveň výhody expozice více svazky i tvarovaného svazku, a ještě by se tak zvýšila rychlost expozice [20].

1.1.3 Vývoj systémů využívajících pomalé elektrony

V posledních letech dochází k rozvoji systémů, které pracují se stále nižšími hodnotami energií elektronů v primárním svazku. Je to z důvodu malého rozptylu zpětně odražených

elektronů při interakci s rezistem, a tím pádem snadnějším korekcím expoziční dávky v kritických místech motivu [21]. Výhodou jsou i mnohem nižší expoziční dávky ve srovnání se systémy s vysokými energiemi, což má za následek nižší tepelné namáhání rezistu. Jde to i ruku v ruce s novými trendy vývoje chemicky zesílených rezistů, které k expozici obvykle potřebují nižší dávky než běžně dostupný rezist PMMA (polymethylmethakrylát) [22]. Nevýhodou takovýchto systémů je problematičtější návrh elektronově optické soustavy (kvůli coulombovským interakcím mezi elektrony) [23]. Další nevýhodou je pak malá penetrační hloubka primárního svazku, jež není dostačující pro přípravu hlubších DOE. U přípravy foto-masek, kde se většinou pracuje s velmi tenkou vrstvou rezistu, to problém není.

Zcela extrémním případem přístupu snižování energie primárního svazku je expozice pomocí velmi pomalých elektronů, které mají energii srovnatelnou se sekundárními elektrony (jednotky eV). Standardně elektronová litografie využívá energie primárního svazku k vybuzení sekundárních elektronů, které v rezistu zapříčiňují chemicko-fyzikální změny a dochází tak k expozici [24]. Zmíněný extrémní případ využívá k ozařování rezistu přímo velmi pomalé elektrony. Tato koncepce má velikou výhodu v tom, že bez urychleného primárního svazku elektronů nedochází k nežádoucímu rozptylu elektronů v látce (dochází k expozici i ve velké vzdálenosti od dopadu urychleného svazku elektronů). Opět je tu problém s konstrukcí elektronově optické soustavy kvůli coulombovským interakcím mezi elektrony [25]. Dalším omezením tohoto způsobu expozice je penetrační hloubka pomalých elektronů. Ta dosahuje v polymerních rezistech maximálně desítek nanometrů, což by bylo dostačující pro potřeby foto-masek, nicméně pro přípravu hlubokých DOE je to nepoužitelné [26][27]. Avšak s vývojem nových rezistových materiálů by se penetrační hloubka mohla případně zvýšit.

1.1.4 Vývoj chemicky zesílených rezistů

Vývoj chemicky zesílených rezistů (CAR – *Chemically Amplified Resist*) začal v 80. letech 20. století kvůli potřebám UV litografie. V té době se začalo přecházet z vlnové délky 365 nm a 313 nm na 248 nm kvůli zvyšování rozlišení exponovaných struktur, a tím vznikla potřeba nových rezistových materiálů citlivých v této oblasti UV spektra (v dnešní době pak 193 nm) [28]. Standardní rezisty fungují na principu sesítování (negativní rezist) nebo rozpadu (pozitivní rezist) makromolekul, jinak řečeno mění se rozpustnost exponovaných

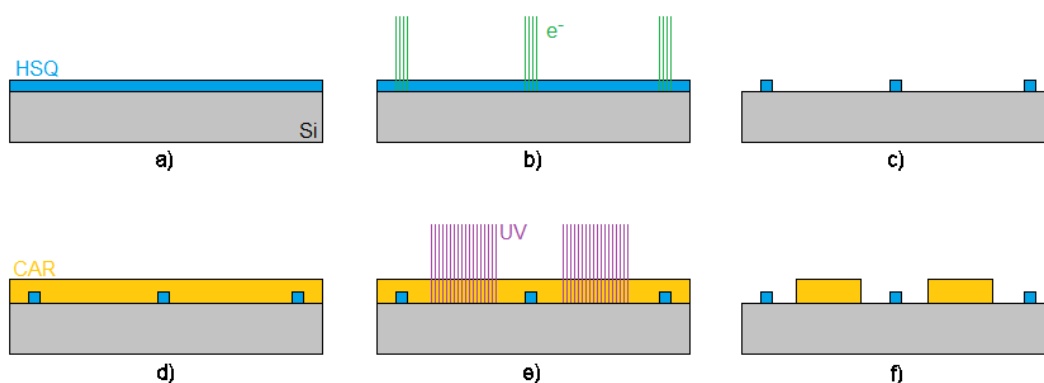
míst rezistu. Tyto procesy jsou zapříčiněny energií absorbovanou z fotonů (UV litografie) nebo sekundárních elektronů (EBL), kdy jeden foton/elektron způsobí sesíťování/rozpad jedné síťovací vazby. V případě negativních rezistů CAR probíhá síťovací reakce ve dvou krocích. První část reakce (expozice) zapříčiní vznik meziproduktů (ale nezmění se rozpustnost rezistu), které slouží jako katalyzátory řetězové reakce, která se spustí po zahřátí rezistu (*post-exposure bake*), a tím se již změní rozpustnost rezistu. Rozdílem oproti standardním rezistům je to, že jeden foton/elektron, zapříčiňující vznik jedné molekuly katalyzátoru, způsobí sesíťování/rozpad několika síťovacích vazeb [29][30]. To způsobuje vyšší citlivost oproti konvenčním rezistům, čímž se může použít nižší expoziční dávka při stejném proudu ve svazku a může se tak zvýšit rychlost expozice. U vývoje těchto rezistů se dále klade důraz na vysoký kontrast, zvýšenou odolnost vůči leptacím technikám a použití v širokém spektru energií primárního svazku elektronů [31][32]. Jak se zvyšuje rozlišení vytvářených struktur, začíná se jejich velikost blížit velikostem jednotlivých makromolekul, což ovlivňuje kvalitu výsledné expozice, a tedy i toto hledisko musí být při vývoji nových materiálů zohledňováno [33]. Zajímavou vlastností CAR rezistů je jejich citlivost na UV záření (254 nm; 193 nm; 13,5 nm) a zároveň na elektrony [34], čehož se využívá v hybridní litografii při expozici do jedné vrstvy rezistu. Požadavky na vývoj nových rezistů, stejně jako všechny vývojové směry v elektronové litografii, vycházejí z potřeb přípravy masek pro polovodičové součástky, a tudíž se soustředí na binární litografii a vysoké rozlišení v tenké vrstvě rezistu. Tyto požadavky se bohužel neslučují s požadavky na přípravu komplikovaných DOE (hluboký rezist, nižší citlivost rezistu apod.), a proto většina rezistů CAR není pro tyto aplikace příliš vhodná.

1.2 Kombinovaná litografie

Kombinovanou litografií se standardně rozumí kombinace elektronové litografie a UV litografie. Na část motivu, kde je vyžadováno vysoké rozlišení, se využije elektronová litografie, a tam, kde motiv není tak náročný na detaily, se použije UV litografie (ať už pomocí masky nebo přímého zápisu) [35]. Tato kombinovaná technika se používá výhradně pro účely binární litografie v polovodičovém průmyslu a důvodem jejího vývoje bylo ušetření časových (finančních) nároků na elektronovou litografii. Existují dvě její modifikace popsané níže – Mix & Match litografie a hybridní litografie [7][36][37].

1.2.1 Mix & Match litografie

V tomto případě se pro každý litografický krok použije jiný typ rezistu vyhovující dané technologii. Jeden z nich (většinou HSQ – *hydrogen silsesquioxane* – vysokorozlišovací negativní rezist) je kompatibilní s EBL (první expozice) a druhý (většinou CAR) je kompatibilní s UV litografií (většinou i s EBL, což ale není podmínkou) [38][39]. Tato varianta neklade takové nároky na sladění jednotlivých technologií, jelikož expozice se navzájem neovlivňují a motivy nejsou vyvolány v jednom kroku. Nicméně přibývá zde jeden krok nanášení druhé rezistové vrstvy a zároveň vývojka pro druhý rezist nesmí ovlivňovat výsledek expozice v prvním rezistu. Proces Mix & Match litografie je znázorněn na obr. 1.

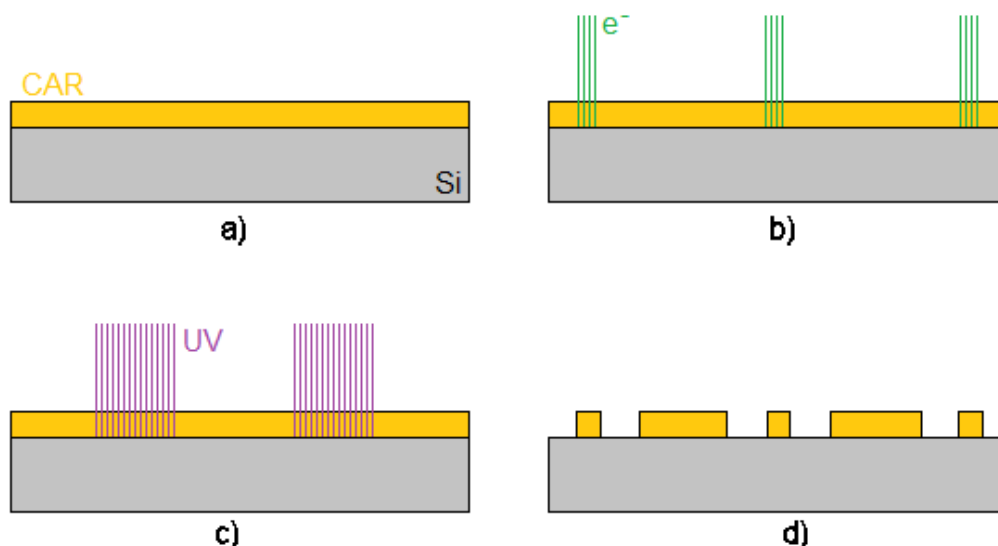


Obr. 1 Proces Mix & Match litografie. Nanesení elektronového rezistu (a), expozice elektronovým svazkem (b), vyvolání elektronového rezistu (c), nanesení UV rezistu (d), expozice UV zářením (e), vyvolání UV rezistu (f).

1.2.2 Hybridní litografie

Rozdíl oproti výše zmíněné variantě spočívá v tom, že se expozice pomocí UV záření i elektronů provádí do téže rezistové vrstvy. Používají se CAR rezisty kvůli kompatibilitě EBL a UV litografie. Jako první se provádí expozice elektronovým svazkem a následně expozice UV světlem. Proces hybridní litografie je znázorněn na obr. 2. Výhodou této techniky je použití pouze jedné rezistové vrstvy [40]. Zároveň je to i nevýhoda, protože je obtížné sladit oba dva procesy dohromady. Dalším problémem mohou být prostoje mezi oběma procesy, které mají nežádoucí dopad na vlastnosti rezistu [7][41].

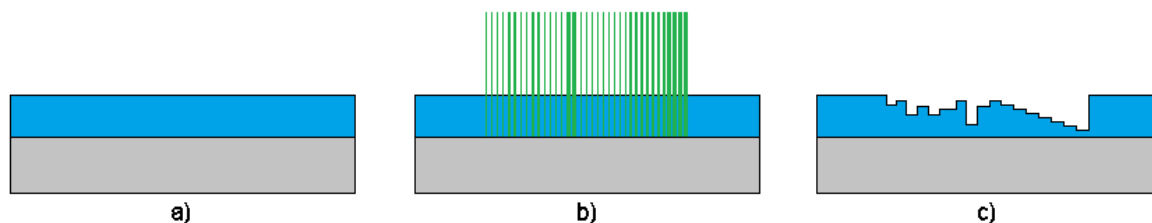
Společnou výzvou obou variant je přesné sesouhlasení obou expozic a zároveň je nezbytné exponovat s určitou mírou překryvů (většinou na straně EBL), aby se předešlo nežádoucímu rozpojení jednotlivých motivů [42].



Obr. 2 Proces hybridní litografie. Nanesení rezistu (a), expozice elektronovým svazkem (b), expozice UV světlem (c), vyvolání rezistu (d).

1.3 Reliéfní litografie

V reliéfní litografii (obr. 3) se struktury vytváří pouze v rámci rezistové vrstvy, která má obvykle větší tloušťku (stovky nanometrů až jednotky mikrometrů), na rozdíl od binární litografie, která slouží především pro přípravu masek pro další technologické operace. Proces vyvolání exponovaného motivu může být přerušen v libovolném čase (po dosažení požadované hloubky) a tím se mohou vytvářet struktury s různou hloubkou na jednom substrátu v rámci jedné expozice.



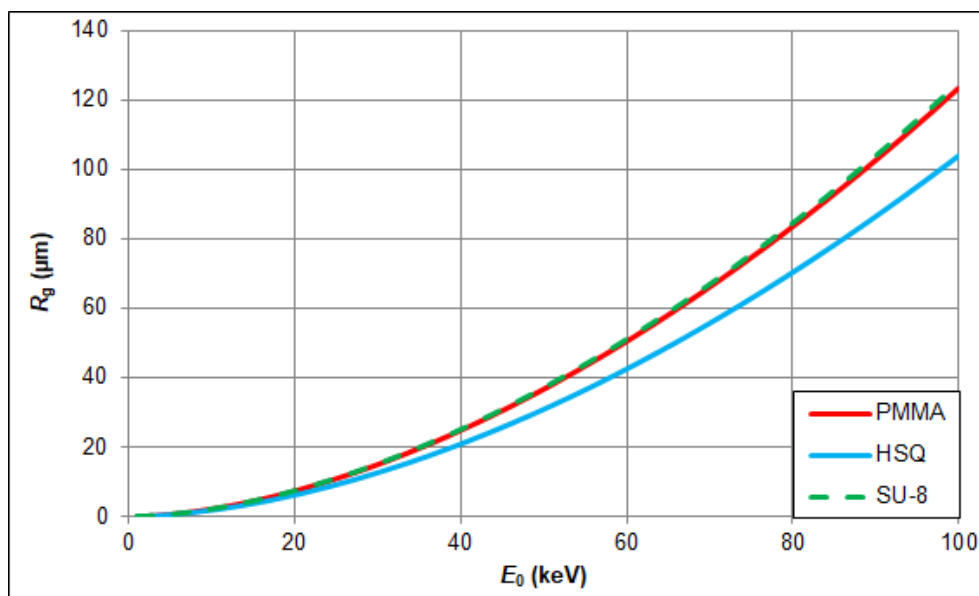
Obr. 3 Proces reliéfní elektronové litografie. Nanesení rezistu (a), expozice elektronovým svazkem různými lokálními dávkami (b), vyvolání rezistu (c).

1.3.1 Energie elektronů primárního svazku

Základním aspektem, který určuje možnosti reliéfní EBL z hlediska vhodnosti pro tvorbu různých typů struktur, je energie elektronů primárního svazku, která je dána urychlovacím napětím daného systému. Energie elektronů v primárním svazku určuje, jakým způsobem budou elektrony interagovat s rezistivním materiálem (dolet elektronů, rozptyl elektronů). Dolet elektronů může být definován dle následujícího empirického vztahu [24]:

$$R_g = \frac{0,046E_0^{1,75}}{\rho}, \quad (1)$$

kde R_g (μm) je dolet elektronů (tzv. Grünův dolet), E_0 (keV) je energie elektronů primárního svazku a ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) je měrná hmotnost látky (rezistu). Na obr. 4 je uveden příklad závislosti doletu elektronů na energii elektronů pro různé typy rezistů (materiálové konstanty převzaty z GenISys TRACER [43]).

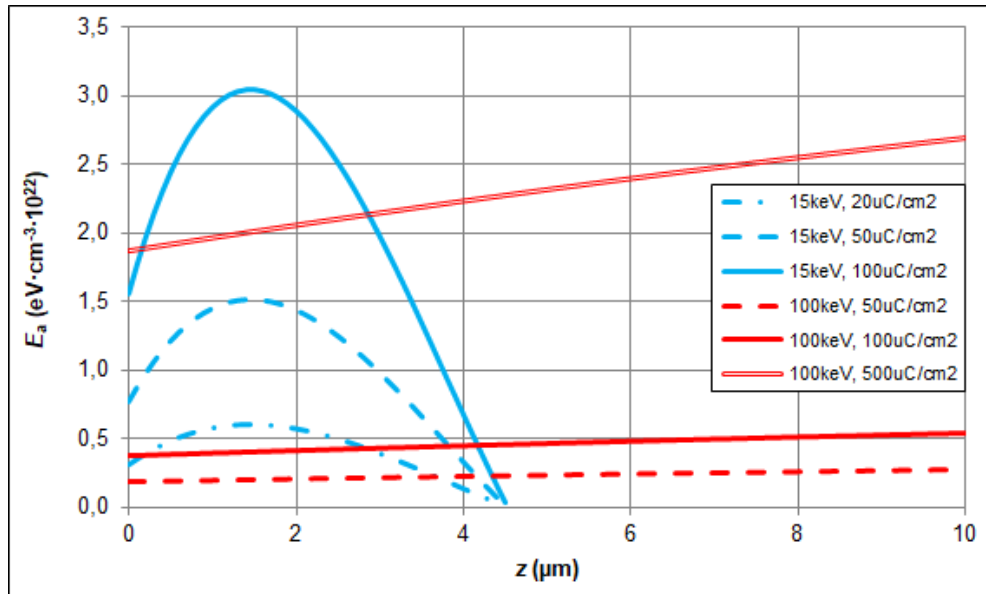


Obr. 4 Závislost doletu elektronů na jejich energii pro různé rezisty.

Jak je vidět na uvedeném příkladu, elektrony s vyšší energií snadněji pronikají rezistem a mohou tak generovat sekundární elektrony ve větší hloubce. S jakou účinností dochází ke generaci sekundárních elektronů, které způsobují expozici rezistu, udává hustota absorbované energie [24]:

$$E_a = \frac{QE_0}{eR_g} \lambda(f), \quad (2)$$

kde E_a je hustota absorbované energie ($\text{eV} \cdot \text{cm}^{-3}$), Q je expoziční dávka ($\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$), E_0 je energie elektronů v primárním svazku (eV), e je elementární náboj elektronu (C), R_g je dolet elektronů v rezistu (cm), $\lambda(f)$ je funkce hloubka/dávka vyjádřená pomocí normalizovaného průniku $f = z/R_g$ v polynomicke formě ($\lambda(f) = 0,74 + 4,7f - 8,9f^2 + 3,5f^3$), kde z je penetrační hloubka (μm). Na obr. 5 je uvedena závislost hustoty absorbované energie na penetrační hloubce pro dvě různé energie elektronů primárního svazku v rezistu PMMA pro různé expoziční dávky.



Obr. 5 Závislost hustoty absorbované energie na penetrační hloubce pro energie elektronů primárního svazku 15 keV a 100 keV v rezistu PMMA pro různé expoziční dávky.

Elektrony s vyšší energií tedy mohou generovat sekundární elektrony mnohem dále od povrchu rezistu. Díky tomu systémy s vyšší energií elektronů v primárním svazku mohou exponovat a vytvářet mnohem hlubší struktury. Nicméně kvůli jejich vyšší energii je menší pravděpodobnost, že vybudí sekundární elektron. Proto je hustota absorbované energie pro stejnou expoziční dávku nižší než v případě elektronů s nižší energií. Abychom tedy dosáhli podobného chování rezistu pro různé energie primárního svazku, musí se v případě vyšší energie elektronů primárního svazku použít mnohem vyšší expoziční dávka.

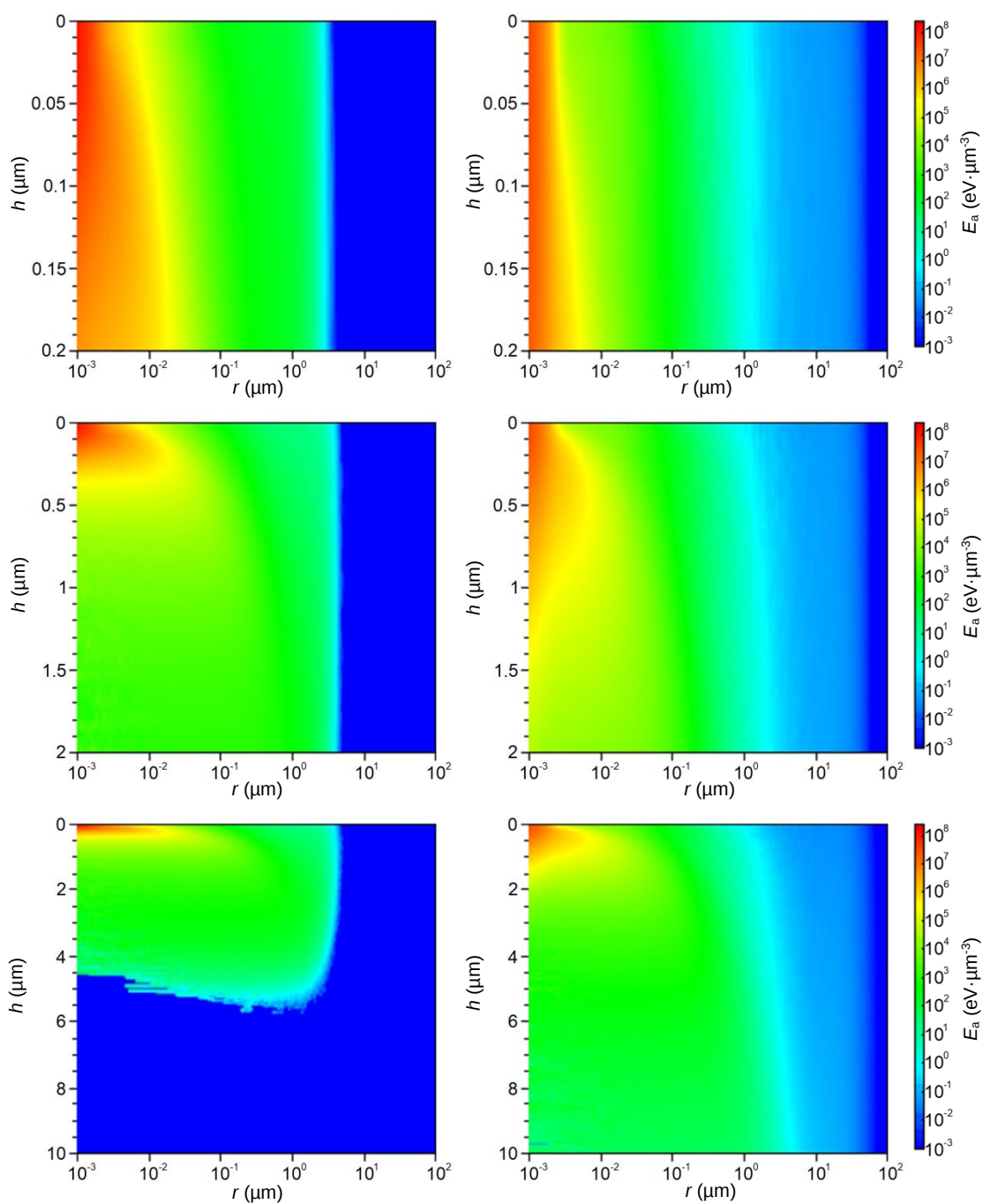
1.3.2 Proximity efekt

Výše popsané interakce elektronů s látkou (rezistem) uvažují pouze sekundární elektrony generované idealizovaným nerozptýleným primárním svazkem. Ve skutečnosti ale dochází k rozptylu elektronů v látce, tyto rozptýlené elektrony také generují sekundární elektrony a dochází tedy k expozici rezistu i mimo místo dopadu primárního svazku. Tento jev se nazývá *proximity efekt* (jev blízkosti). Matematicky je popsán pomocí funkce, která vyjadřuje rozložení hustoty absorbované energie v určité vzdálenosti od místa dopadu elektronů v dané hloubce rezistu. Často bývá aproximován jako dvojitá Gaussova funkce [44][45][46][47][48]:

$$f(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) \right] \text{ pro} \quad (3)$$

$$\int_0^\infty 2\pi \cdot f(r) \cdot r dr = 1,$$

kde r (μm) je vzdálenost od místa dopadu elektronu, α (μm) je laterální dosah dopředně rozptýlených elektronů, β (μm) je laterální dosah zpětně odražených elektronů a η (-) je poměr absorbované energie zpětně odražených elektronů vůči dopředně rozptýleným elektronům. Parametry α , β , η se získávají z vyhodnocení Monte-Carlo simulací interakcí elektronů s rezistem [49][50][51][52]. Tyto parametry mohou být ovšem stanoveny i experimentálně [45][53][54][55]. Na obr. 6 jsou uvedeny výsledky takovýchto simulací jako závislosti hustoty absorbované energie v objemu rezistu na vzdálenosti od místa dopadu bodového svazku (Monte-Carlo simulace ze softwaru GenISys TRACER). Hodnoty jednotlivých parametrů se mohou lišit podle toho, jakým způsobem byly získány (simulační model/experiment), ale zároveň i podle konfigurace soustavy, pro kterou jsou určovány (substrát, rezist, energie elektronů apod.). V tabulce 1 jsou uvedeny příklady hodnot jednotlivých parametrů proximity efektu (u dna rezistu – rozhraní substrát / rezist) pro různé tloušťky rezistu PMMA na křemíkovém substrátu a různé energie elektronů (hodnoty byly získány ze simulačního softwaru GenISys TRACER).



Obr. 6 Závislost hustoty absorbované energie v objemu rezistu (PMMA na Si substrátu) na vzdálenosti od místa dopadu bodového svazku pro tloušťky rezistu 0,2 μm , 2 μm a 10 μm a pro energie elektronů v primárním svazku 15 keV (vlevo) a 100 keV (vpravo).

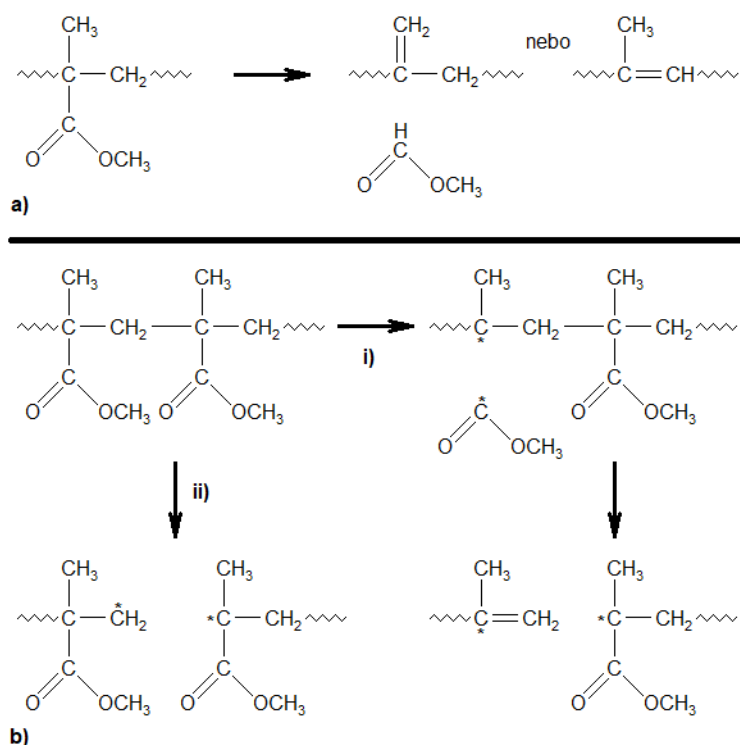
Tab. 1 Parametry proximity efektu pro různé tloušťky rezistu PMMA na křemíkovém substrátu u dna rezistu (rozhraní substrát / rezist).

Energie elektronů (keV)	Tloušťka rezistu (nm)	α (μm)	β (μm)	η (μm)
15	200	0,022	1,1	0,83
	500	0,100	1,2	1,08
	1000	0,297	1,2	1,73
	2000	0,770	1,6	3,85
100	200	0,003	30,3	0,62
	500	0,008	30,2	0,67
	1000	0,040	30,8	0,69
	2000	0,129	30,8	0,70

Parametry proximity efektu se používají pro výpočet korekcí expozice motivu (PEC – z anglického *proximity effect correction*). Existují dvě základní metody, a to korekce expoziční dávky nebo korekce exponovaného tvaru. Používají se i kombinace obou metod [44][56][57]. V každé hladině rezistu nabývají parametry proximity efektu jiných hodnot. Pro korekci v binární litografii se nejčastěji pracuje s hodnotami parametrů u dna rezistu. Korekce v reliéfní litografii jsou mnohem náročnější a existuje několik přístupů, kdy ale většina z nich pracuje stále s jednou sadou parametrů v rámci celé rezistové vrstvy [56][58][59]. Důležité je tedy zvolit pro každý typ motivu vhodný model a přístup ke korekci proximity efektu a zároveň ověřit na skutečné expozici, že daný přístup je platný a případně podle výsledků expozice stávající model upravit [60][61].

1.3.3 Rezistové procesy

Pro reliéfní elektronovou litografii jsou vhodnější pozitivní rezisty, protože pro vyšší tloušťky rezistu mají vyšší rozlišení a lépe se u nich ovládá ladění dávky v různých hladinách rezistové vrstvy. Pozitivní elektronový rezist PMMA (polymethylmethakrylát) je stále nejpoužívanějším rezistem v elektronové litografii. Dostupnost, různé varianty (délky polymerních řetězců), cena, dosažitelné rozlišení a snadné zpracování z něj dělají skvělého kandidáta na reliéfní elektronovou litografii [62][63][64]. Základní makromolekula se působením elektronů s nízkou energií rozbíjí na jednotlivé fragmenty (viz obr. 7) a zvýší se tak rozpustnost rezistu ve vývojce [65].



Obr. 7 Schematické znázornění makromolekuly PMMA rezistu a naznačení jejího rozpadu působením elektronového záření. *B*-eliminace a odstranění esterové skupiny (a). Rozpad polymerního řetězce za vzniku esterové skupiny (b, i) nebo přímý proces (b, ii).

V místech ozářených elektronovým svazkem dojde tedy k poklesu průměrné molární hmotnosti rezistu, to může být vyjádřeno následujícím vztahem [24][63]:

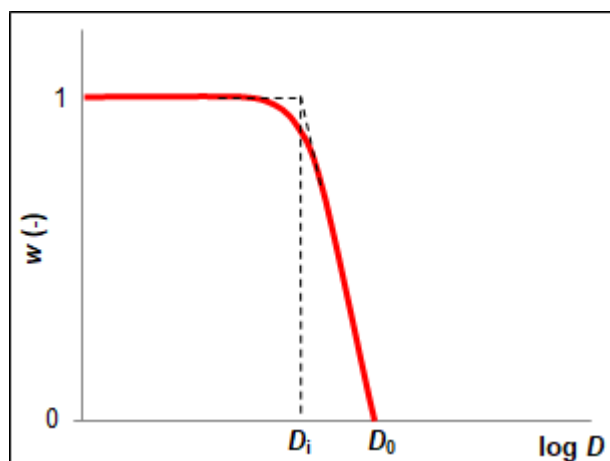
$$M_f = \frac{M_i}{1 + (gE_a M_i) / \rho N_A}, \quad (4)$$

kde M_f je konečná molární hmotnost ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), M_i je výchozí molární hmotnost rezistu ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$), g je degradační účinnost rezistu vyjádřená počtem rozpadnutých vazeb na jednotku absorbované energie (počet případů na 100 eV), E_a je hustota absorbované energie ($\text{eV} \cdot \text{cm}^{-3}$), ρ je měrná hmotnost rezistu ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) a N_A je Avogadrova konstanta (mol^{-1}). Pokud známe molární hmotnost fragmentů vzniklých po expozici elektronovým svazkem, dá se vyjádřit rychlost rozpouštění exponovaného rezistu ve vývojce empirickým vztahem [63]:

$$V_f = V_0 + \frac{k_1}{M_f^{k_2}}, \quad (5)$$

kde V_f je rychlost rozpouštění exponovaného rezistu (obvykle $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$), V_0 je rychlost rozpouštění neexponovaného rezistu, M_f je molární hmotnost exponovaných fragmentů a parametry k_1 a k_2 jsou konstanty charakterizující vývojku, které se stanovují experimentálně.

Dva nejdůležitější parametry charakterizující soustavu rezist / vývojka jsou plošná citlivost a kontrast. Tyto dva parametry se určují experimentálně z tzv. křivky citlivosti. To je závislost normovaného úbytku tloušťky rezistové vrstvy na expoziční dávce. Příklad takové křivky je uveden na obr. 8 [66]. Křivka citlivosti se získá vyvoláním série obrazců exponovaných různými dávkami, jejichž laterální rozměry jsou alespoň dvojnásobné než hodnota parametru β proximity efektu.



Obr. 8 Křivka citlivosti pro pozitivní rezist.

Expoziční dávka D_0 se nazývá citlivost rezistu, což je nejnižší expoziční dávka, kdy je rezist vyvolán až na povrch substrátu (když je tato dávka nízká, má rezist vysokou citlivost). Expoziční dávka D_i je extrapolovaná dávka z lineární části křivky pro nulový úbytek rezistu. Z těchto dvou dávek potom můžeme vyjádřit kontrast rezistu, který udává, s jakou rychlostí rezist reaguje na změny expoziční dávky [63]:

$$\gamma = \frac{1}{\log D_0 - \log D_i}. \quad (6)$$

V binární litografii je vhodnější použít rezist s vysokou citlivostí (nízká expoziční dávka kvůli rychlosti expozice) a zároveň s velmi vysokým kontrastem (10 a vyšší). V reliéfní litografii je naopak výhodnější nižší citlivost a nižší kontrast (2 a nižší), aby bylo celé procesní okno co největší (rozsah dávek, doba vyvolání apod.).

Reliéfní litografie dále klade požadavky na homogenitu tloušťky rezistové vrstvy. Nehomogenity v tloušťce způsobí komplikace při ladění správného tvaru vytvářené struktury, protože, jak už bylo řečeno, pro různé tloušťky rezistu platí různé rozptylové parametry potřebné ke korekci proximity efektu. To souvisí s problematikou přípravy takovýchto vrstev. Obvykle se rezisty nanáší z roztoku v kompatibilních rozpouštědlech (pro PMMA je to anisol nebo dříve chlorbenzen) pomocí odstředivého lití, což je nejdostupnější způsob [67]. Čím tlustší vrstvu je potřeba nanést, tím viskóznější je daný roztok, a tím větší je problém nanést homogenní vrstvu. To může ještě více zkomplikovat tvar substrátu (jiný než kruhový) a stejně tak substrát, který obsahuje nerovnosti (např. struktury připravené při předchozím procesu). Toto je částečně možné vyřešit nanášením několika tenčích vrstev postupně na sebe. Existují i jiné techniky nanášení, které mají své výhody a nevýhody (cena technologie, spotřeba rezistu, možnost nanášení na substráty libovolného tvaru, homogenita vrstvy apod.) – sprejování, máčení, rotační nanášení apod. [68][69]. Je tedy nutné zvolit správný způsob nanášení pro daný substrát a rezist, aby se dosáhlo nanesení co nejhomogennější vrstvy rezistu v oblasti na substrátu, kde se bude expozice provádět.

1.4 Elektronové litografy Tesla BS600 a Raith EBPG5000+ ES

Jedním z témat řešených v této práci je kombinace expozic vytvořených pomocí dvou různých litografů. Jeden z nich, Tesla BS600, pracuje s tvarovaným pravoúhlým svazkem s energií elektronů 15 keV. Dokáže pracovat ve dvou režimech. Standardní režim umožňuje použít maximální možnou velikost svazku za cenu nižší proudové hustoty ve svazku. Druhý režim je označován jako TZ mód (*Technologický Zoom*), kdy díky změně nastavení optické soustavy dojde k devítinásobnému zvýšení proudové hustoty ve svazku a k trojnásobnému zmenšení rozměrů svazku [70][71][72][73]. Základní parametry litografu jsou uvedeny v tabulce 2. Druhý litograf, Raith EBPG 5000+ ES, pracuje s Gaussovským svazkem s energií elektronů volitelnou mezi 100 keV a 50 keV. Základní parametry tohoto systému jsou opět uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2 Základní parametry litografu Tesla BS 600 a Raith EBPG 5000+ ES [73][74].

Parametr	Tesla BS600	Raith EBPG 5000+ ES
Zdroj elektronů	Autoemisní W/ZrO	Autoemisní W/ZrO
Energie elektronů ve svazku	15 keV	50, 100 keV
Velikost proudu ve svazku	3 pA – 40 nA	100 pA – 200 nA
Tvar a rozměr svazku	Pravouhlý: 17–6300 nm	Gaussovský: 2,5–~1000 nm
Rozlišení vychylování svazku	17 nm	0,5–0,08 nm
Velikost vychylovacího pole	2000×2000 (3000×3000) μm^2 *	410×410 μm^2 , 262×262 μm^2 **
Rozlišení polohování stolu	40 nm	0,5–0,08 nm
Maximální velikost substrátu	4“ kruhový substrát nebo čtvercová maska	6“ kruhový substrát nebo čtvercová maska

* 2000×2000 μm^2 se používá kvůli teplotní stabilitě vychylovacích cívek.

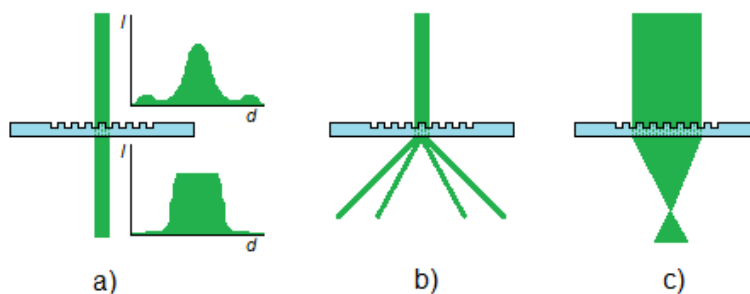
**410×410 μm^2 je pro 50 keV, 262×262 μm^2 je pro 100 keV.

Příprava expozičních dat pro systém BS600 probíhá v softwaru, který zároveň slouží k ovládání samotného litografu. Expoziční data jsou ve specifickém formátu (vychází z programovacího jazyka assembler) pro daný litograf. Instrukce pro expozici daného motivu se přímo zapisují ve zmíněném formátu (řízení jednotlivých záblesků, posuny stolů apod.) a tvorba motivu je tedy zcela pod kontrolou operátora. Software mimo jiné obsahuje i nástroj na simulaci proximity efektu a nástroj na výpočet korekcí proximity efektu.

V případě systému EBPG5000+ ES se expoziční data dají opět vytvářet přímo v softwaru, který slouží k ovládání litografu. Nicméně zde je omezení pouze na několik základních tvarů motivů a jejich opakování a operátor nemá zcela pod kontrolou všechny parametry expozice. Proto se většinou pro přípravu expozičních dat používají komerčně dostupné softwary, které mimo přípravu expozičních dat umožňují i počítání PEC. Pro účely přípravy expozičních dat pro systém EBPG5000+ ES bude v této práci použit software GenISys BEAMER [76]. Příprava expozičních dat probíhá ve třech krocích. Prvním krokem je vytvoření předlohy motivu. Ta může být ve formátu bitové mapy, textového formátu (vektorově definované objekty), formátu používaného CAD softwaru apod. Takto vytvořená předloha se načte v softwaru GenISys BEAMER a může se s motivem dále pracovat – počítat PEC, zvětšovat/zmenšovat motiv, kombinovat s jiným motivem apod. Posledním krokem je vygenerování expozičních dat pro systém EBPG5000+ ES. Data jsou ve formátu GPF (*generic pattern format*) [77]. V tomto kroku je možné zvolit velikosti posunu stolů, rozlišení, se kterým se má expozice provést, strategii zápisu apod.

1.5 Difrakční optické elementy

Difrakční optické elementy (DOE – z anglického *diffractive optical element*) jsou planární mikrostruktury, které modifikují dopadající vlnoplochu skrze změnu fáze a interferenci [78]. DOE mají široké spektrum použití v optických systémech tam, kde si nevystačíme s klasickou objemovou optikou (ať už kvůli úspoře prostoru a materiálu nebo kvůli požadované funkci). Mohou zastávat funkci tvarovače svazku, kdy se vhodnou strukturou změni např. tvar profilu procházejícího svazku. Dalším typem DOE jsou různé děliče svazku, které dopadající svazek rozdělí na více (ve většině aplikací) samostatných svazků. Dále např. různé fokusační prvky (čočky), které podobně jako klasické objemové čočky fokusují či defokusují dopadající svazek. Příklady funkce takovýchto prvků jsou uvedeny na obr. 9.



Obr. 9 Příklady funkce různých typů DOE. Tvarovač profilu svazku (a), dělič svazku (b), fokusační prvek (c).

Výše zmíněné typy DOE se dají z hlediska provedení vyhodnocovat podle různých optických parametrů [79]. Základním parametrem je difrakční účinnost v žádoucích difrakčních řádech. Difrakční účinnost v žádoucích difrakčních řádech vztažená ke všem existujícím difrakčním řádům daného DOE (užitečné i parazitní) se dá definovat jako:

$$\eta_{\text{ef}} = \frac{\sum_{k=1}^m I_k}{\sum_{i=0}^n I_i} \cdot 100\%, \quad (7)$$

kde η_{ef} je celková účinnost užitečných difrakčních řádů, I_k je intenzita jednotlivých užitečných difrakčních řádů, I_i je intenzita jednotlivých difrakčních řádů (užitečných i parazitních).

Dalším často užívaným parametrem při návrhu a realizaci DOE je homogenita užitečných difrakčních řádů. Ta se dá vyjádřit jako:

$$H = \frac{I_{k,\min}}{I_{k,\max}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

kde H je homogenita užitečných difrakčních řádů, $I_{k,\max}$ je intenzita nejsilnějšího užitečného difrakčního řádu, $I_{k,\min}$ je intenzita nejslabšího užitečného difrakčního řádu. Pro vyhodnocení parazitních difrakčních řádů se často udává parametr tzv. *stray light*, který vyjadřuje difrakční účinnost nejintenzivnějšího parazitního difrakčního řádu:

$$\eta_s = \frac{I_{s,\max}}{\sum_{i=0}^n I_i} \cdot 100\%, \quad (9)$$

kde η_s je účinnost nejintenzivnějšího parazitního difrakčního řádu, $I_{s,\max}$ je intenzita nejsilnějšího parazitního difrakčního řádu. Někdy se také vyhodnocuje zvlášť difrakční účinnost nultého difrakčního řádu, která se dá vyjádřit jako:

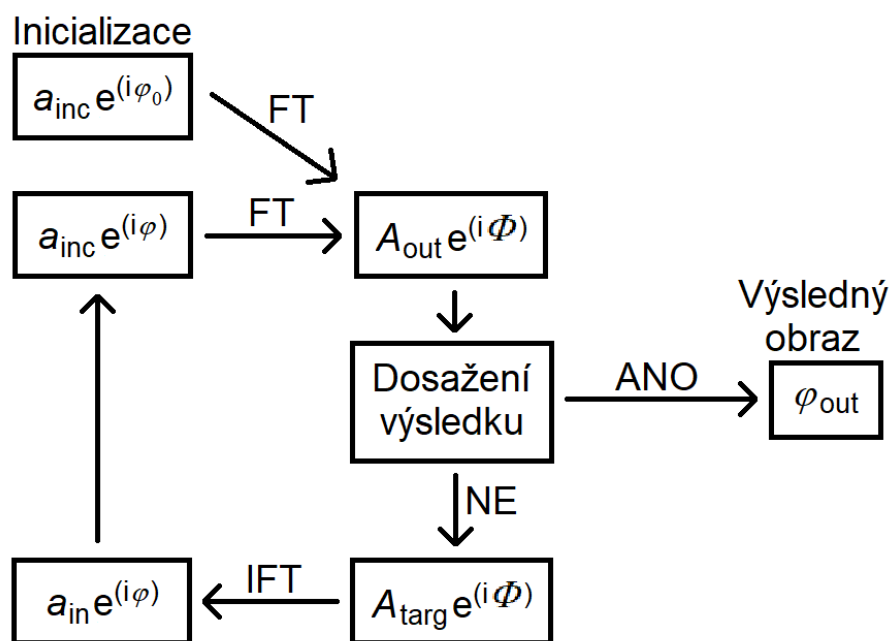
$$\eta_0 = \frac{I_0}{\sum_{i=0}^n I_i} \cdot 100\%, \quad (10)$$

kde η_0 je účinnost nultého difrakčního řádu, I_0 je intenzita nultého difrakčního řádu. Váha jednotlivých parametrů záleží vždy na konkrétním typu DOE a jeho aplikaci.

Další oblastí použití DOE jsou syntetické hologramy, které většinou slouží jako zabezpečovací prvky proti padělání [80]. Na rozdíl od výše zmíněných parametrů se u syntetických hologramů klade důraz především na estetickou stránku motivu. Hodnoty ostatních parametrů, pokud nenarušují celkovou kompozici motivu, jsou upozaděny.

Pro návrh DOE existují různé přístupy. Od řešení mřížkové rovnice pro vytvoření jednoduchého děliče svazku, přes grafický design bezpečnostního hologramu uvažující předpokládané chování různých typů DOE, až po různé iterativní algoritmy pro přípravu složitých počítačově generovaných struktur. Jedním z takových algoritmů je i iterativní

algoritmus Fourierovy transformace (IFTA – z anglického *iterative Fourier-transform algorithm*), který bude využit pro přípravu některých testovacích motivů v rámci této práce. Funguje na principu změny distribuce vstupního signálu po dopadu na navrhovaný prvek na jinou distribuci výstupního signálu, kdy se v každé iteraci vyhodnocují zadané parametry (např. výše zmíněné), dokud se nedosáhne kýženého výsledku nebo určitého počtu iterací. Jeden z principů IFTA podle [81] je naznačen na obr. 10.

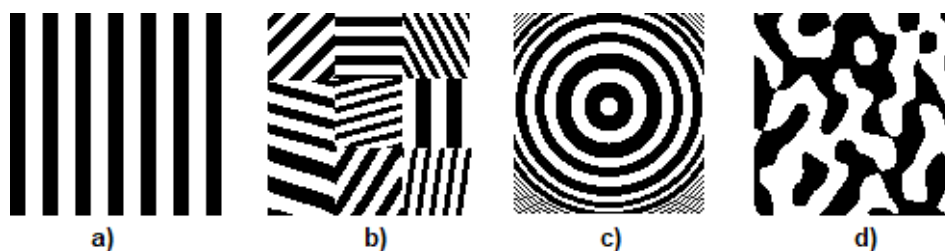


Obr. 10 Princip algoritmu IFTA pro přípravu DOE.

Na začátku výpočtu se zvolí náhodná fázová složka obrazu φ_0 a přidá se k amplitudě dopadající vlny a_{inc} (obvykle uniformní přes celou plochu struktury). Fourierova transformace tohoto komplexního pole nám dá amplitudovou složku výsledného signálu A_{out} s fázovou složkou Φ . Výsledná amplituda signálu A_{out} se porovná s amplitudou požadovaného signálu A_{targ} . Jestliže se amplituda A_{out} dostatečně blíží amplitudě požadovaného signálu A_{targ} , je výpočet ukončen a fázová složka obrazu v posledním kroku iterace φ reprezentuje výslednou topologii struktury pro expozici φ_{out} . Jestliže nedošlo k dosažení výsledku podle zadaných kritérií, nahradí se amplitudová složka výsledného signálu A_{out} amplitudovou složkou požadovaného signálu A_{targ} a provede se zpětná Fourierova transformace. Amplitudová složka takto získaného obrazu a_{in} se nahradí amplitudou dopadající vlny a_{inc} , fázová složka φ se

zachová. Opět se provede Fourierova transformace obrazu, vyhodnotí se výsledek a celý proces se případně opakuje.

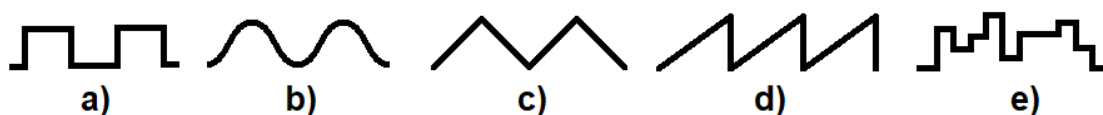
Z hlediska topologie je nejjednodušším DOE lineární periodická mřížka (obr. 11a). Skládáním segmentů lineárních mřížek vznikají složitější DOE (obr. 11b). Mikrostruktury mohou být i nelineární jako např. zonální čočky (obr. 10c). Extrémním případem z pohledu topologie jsou pak počítačem generované hologramy (CGH – z anglického *computer generated hologram*), což jsou obecné neperiodické struktury (obr. 11d).



Obr. 11 Příklady různých typů DOE z hlediska topologie. Lineární periodická mřížka (a), DOE složené ze segmentů lineárních mřížek (b), zonální čočka (c), CGH (d).

Z hlediska elektronové litografie je výhodné připravovat DOE, které jsou co se topologie týče co nejkompaktnější. V takových případech se uplatní vysoké rozlišení elektronové litografie a přímý zápis bod po bodu. Pro přípravu jednodušších DOE existují jiné technologie (UV litografie, interferenční zápis, mechanické rytí), které jsou cenově dostupnější [66]. Oproti elektronové litografii můžou mít řadu výhod. Většina z nich je rychlejší a umožňuje přípravu DOE na větší plochy. Zároveň odpadají problémy s nehomogenitou velkoplošných DOE, kdy se u většiny litografů celý motiv realizuje postupně po jednotlivých polích a subpolích.

Jednotlivé varianty DOE zmíněné výše nemusí mít pouze binární profil (dvě výškově/fázově odlišné úrovně). Různé tvary reliéfu znamenají další možnost, jak se dá řídit funkce daného DOE. Můžeme tím dosáhnout vyšší účinnosti, potlačení nežádoucích difrakčních řádů, asymetrické chování na symetricky uspořádané struktuře apod. [82]. Na obr. 12 je uvedeno několik typů profilů používaných pro konstrukci DOE.



Obr. 12 Profil mikrostruktury DOE. Binární (a), harmonický (b), pila (c), blejzovaný (d), obecný víceúrovňový (e).

Elektronová litografie má proti jiným technikám tu nevýhodu, že jakýkoliv jiný profil než binární (vlivem rozptylových jevů jde spíše o přechod mezi harmonickým a binárním profilem), musí být exponován rozkladem na jednotlivé výškové úrovně, čímž se zvyšuje časová náročnost expozice. V některých případech, pokud to daný systém umožňuje, je do určité míry možné toto omezení obejít vhodným nastavením systému (defokusace elektronového svazku, změna urychlovacího napětí). Většinou se volí kompromis mezi kvalitou profilu (shoda s požadovaným tvarem) a časovou náročností expozice, aby se dosáhlo požadovaných optických parametrů daného DOE.

2 CÍLE DIZERTACE

Cílem dizertační práce je navrhnout metody, které povedou ke zvýšení efektivity při přípravě difrakčních optických elementů pomocí reliéfní elektronové litografie. A to jak na straně přípravy expozičních dat, tak na straně samotného litografického procesu. 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 pomocí 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 funkci různých typů DOE.

3) Optimalizace přípravy víceúrovňových struktur do tlustých vrstev rezistu

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 korekcí proximity efektu na specifický případ takovýchto struktur. Tento cíl byl rozdělen do tří částí:

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

3 VLASTNÍ PRÁCE A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

3.1 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. Metoda by měla být dostatečně obecná, nicméně ladění a testování bude probíhat s využitím dvou systémů zmíněných v kapitole 1.4. Motivací pro tento výzkum bylo využití silných stránek dvou systémů pracujících s rozdílnou energií elektronů v primárním svazku a to jak z hlediska fyzikálních parametrů, tak systémových vlastností dvou konkrétních litografů.

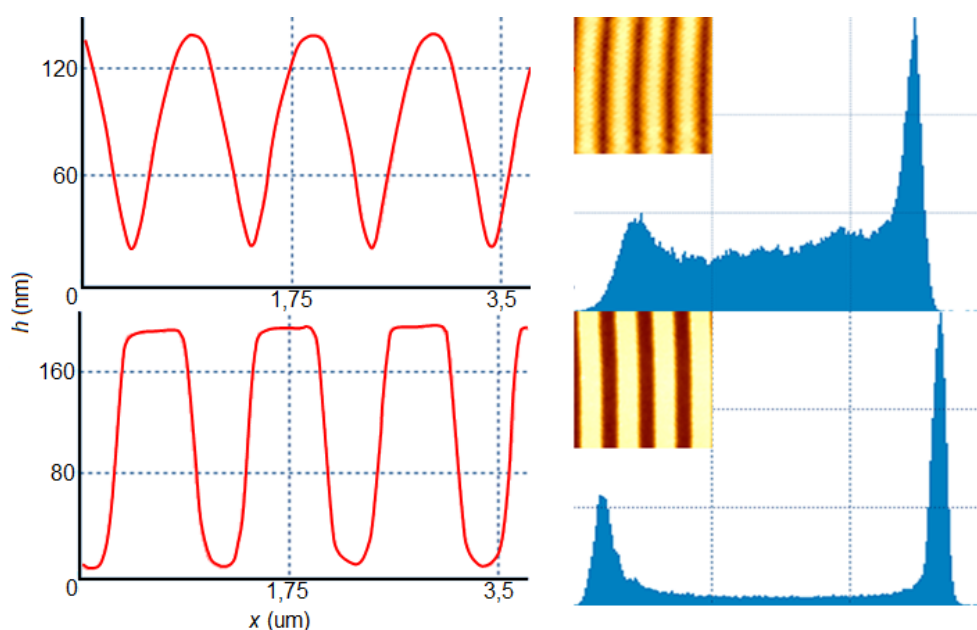
3.1.1 Fyzikální a materiálové předpoklady metody

Jak již bylo řečeno v kapitole 1.3.1, 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. Dále bylo řečeno, že pro stejný proces (rezist, vývojka, doba vyvolání atd.) se musí v případě vyšších energií elektronů v primárním svazku použít mnohem vyšší dávka. Vyšší expoziční dávka znamená (pro stejnou velikost proudu ve svazku), že se dané místo musí exponovat déle, což zvyšuje celkovou expoziční dobu motivu. Z toho by se dalo usuzovat, že mělké struktury (hloubky stovek nanometrů až jednotky mikrometrů) by mělo být výhodnější exponovat pomocí systému s nižší energií elektronů v primárním svazku. Reálně je ovšem rychlost expozice více ovlivněna systémovými parametry litografu než samotnou energií elektronů v primárním svazku. Pokud se mají vytvořit struktury s hloubkou jednotek mikrometrů a více, není jiná možnost než použít systém s vysokou energií elektronů v primárním svazku, aby se rezist v požadované hloubce vůbec naexponoval.

Rozdílné energie elektronů v primárním svazku

Energie elektronů v primárním svazku bude dále v nemalé míře ovlivňovat i tvar profilů vytvářených struktur. To přímo souvisí s rozptylovými parametry pro danou soustavu

substrát-rezist, jak bylo popsáno v kapitole 1.3.2. Pro nižší energii se bude proximity efekt 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), 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. Příklad rozdílného výsledku pro dvě různé energie elektronů v primárním svazku exponované ze srovnatelných vstupních dat je uveden na obr. 13.



Obr. 13 Binární struktura exponovaná pomocí energie elektronů v primárním svazku 15 keV (nahore) a 100 keV (dole) pro stejný proces (substrát, rezist, vyvolání). Profil struktury (vlevo), histogram profilu (vpravo). Měřeno pomocí AFM.

Tento 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 řádech. V příloze A je uvedeno několik příkladů, jak se změní rozložení difrakční účinnosti prvního řádu v závislosti na hloubce struktury pro různé typy profilů struktury a jeho modifikace, které mohou být způsobené výše zmíněným zaoblením. Simulace byly provedeny v softwaru GSolver [83]. Dá se říci, že se změnou profilu vlivem zaoblení, diskretizace apod. dochází jak ke změně maximální difrakční

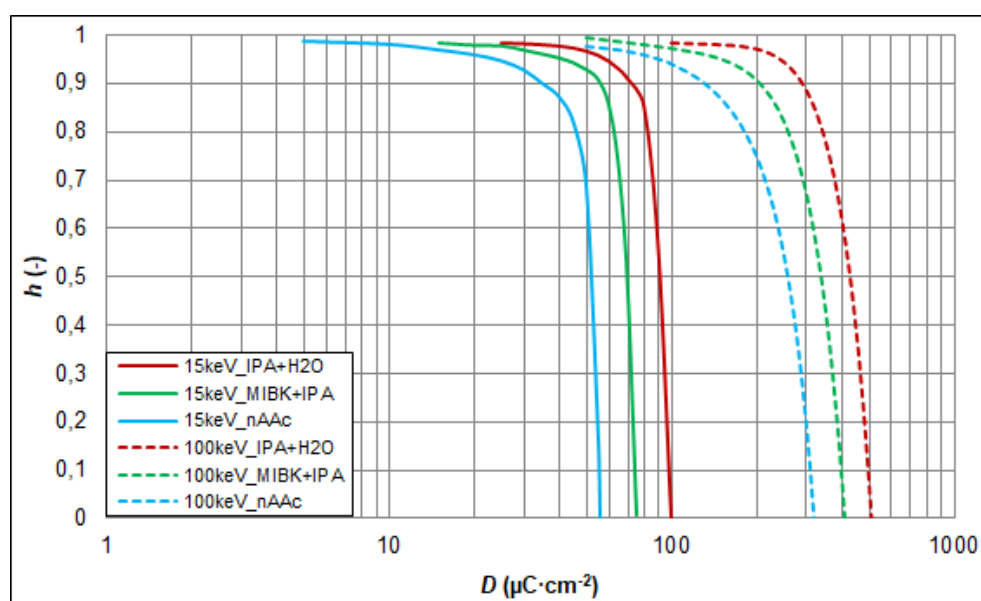
účinnosti v daném difrakčním řádu, tak k posunu difrakčního maxima v závislosti na hloubce profilu mikrostruktury.

Parametr β bude ovlivňovat výslednou expozici především z hlediska topologie. 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 μm (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. To samozřejmě může pozitivně ovlivnit jak přípravu expozičních dat, tak i samotnou dobu expozice. Zvýšená pozornost by ovšem měla být věnována oblastem, kde se skokově mění topologie motivu (přechod mezi oblastmi s rozdílnou hloubkou struktur, hranice motivu apod.). Při kombinaci expozic dvou systémů pracujících s jinou energií elektronů v primárním svazku se situace komplikuje, protože ze zjevných důvodů nemůžeme počítat korekce proximity efektu nezávisle na sobě. Problémem bude především ovlivňování motivů exponovaných nižší energií elektronů v primárním svazku sousedními motivy, které budou exponovány vyšší energií elektronů v primárním svazku, kvůli dosahu zpětně odražených elektronů. Nicméně např. software GenISys BEAMER dokáže počítat PEC pro více různých sad rozptylových parametrů.

Rezist a proces vyvolání

Rezist PMMA byl zvolen jako vhodný pro kombinovanou technologii z důvodů zmíněných na začátku kapitoly 1.3.3. Kromě výše zmíněných důvodů je i ta výhoda, že na rozdíl od většiny rezistů typu CAR nevyžaduje žádný post-bake. Dále na jeho vlastnosti nemají vliv technologické prodlevy v různých částech procesu, které budou vznikat během expozic na dvou různých systémech [84]. Pro určení vhodných vývojek byl připraven test plošné citlivosti. Jako rezist byl použit PMMA s molární hmotností 350k g·mol⁻¹ o přibližné tloušťce 2500 nm. Rezist byl nanesen odstředivým litím na křemíkový substrát a vypečen na vyhřáté plotně (150 °C, 10 minut). Bylo testováno několik typů vývojek, které se používají

v kombinaci s rezistem PMMA. Běžně se používá vývojka na bázi MIBK (methylišobutylketon), která se obvykle ředí alkoholem (IPA – isopropylalkohol), aby se dosáhlo požadované citlivosti. Dále se testovala vývojka na bázi alkoholu (kombinace IPA a malého množství H₂O). Ta se vyznačuje vysokým kontrastem a nízkou citlivostí. 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. Aby se mohl použít stejný test pro oba dva systémy, bude se velikost políček řídit podle β parametru systému s vyšší energií elektronů v primárním svazku, protože zpětně odražené elektrony mají větší dosah. Vyvolání proběhlo ve vyhřívané lázni (teplota 21,5 °C) po dobu 6 minut pro všechny testované kombinace rezist-vývojka. V reliéfní litografii je výhodnější delší vyvolávací čas, a to kvůli většímu procesnímu oknu. Měření testů proběhlo na kontaktním profilometru. Na obr. 14 jsou uvedeny naměřené křivky citlivosti.



Obr. 14 Křivky citlivosti pro rezist PMMA 350k, hloubka 2500 nm, substrát Si, doba vyvolání 6 min, teplota lázně 21,5 °C, expozice s energiemi elektronů v primárním svazku 15 keV a 100 keV.

Kontrast a citlivost pro jednotlivé vývojky jsou uvedeny v tabulce 3 (hodnoty stanoveny dle obr. 8 a vztahu 6).

Tab. 3 Kontrast a citlivosti rezistu PMMA pro vývojky IPA+H₂O, MIBK+IPA a nAAc pro expozice s energií elektronů v primárním svazku 15 keV a 100 keV.

Energie elektronů v primárním svazku	Vývojka	γ (-)	D_0 ($\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$)
15 keV	IPA + H ₂ O	16,5	100
	MIBK + IPA	13,4	75
	nAAc	11,9	55
100 keV	IPA + H ₂ O	6,5	510
	MIBK + IPA	5,7	410
	nAAc	5,7	315

Z výsledných křivek citlivosti vyplývá, že pro kombinovaný proces, kdy by se jednotlivé expozice vyvolaly sekvenčně, bude vhodná kombinace vývojky IPA:H₂O a nAAc. Mají totiž od sebe největší odstup použitých dávek pro daný systém, což bude důležité, aby vyvolání následné expozice z druhého systému neovlivňovalo již vyvolaný výsledek první expozice. Pořadí vývojek je v tomto případě jasné. Nejdříve se použije citlivější vývojka (nAAc) a následně méně citlivá (IPA:H₂O). Volba systému, kterým by se měla provést první expozice, bude záviset především na systémových parametrech (rychlost expozice pro méně citlivou vývojku, možnosti soukrytu expozic apod.). Nicméně předpoklad, že systém s vyšší energií elektronů v primárním svazku se použije pro tvorbu hlubších struktur (vyšší expoziční dávky), naznačuje, že 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 kvůli vysokému kontrastu testovaných vývojek. Pokud by se na reálných strukturách ukázalo, že rozdíl použitých dávek není dostatečný, je možné ještě upravit dobu vyvolání nebo teplotu lázně. To by ale znamenalo, že stejné procesní parametry již nebudou přenositelné pro variantu simultánního vyvolání.

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.

3.1.2 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. To bude přímo ovlivňovat rychlost expozice na obou systémech. Předpoklad je takový, že systémy s tvarovaným svazkem exponují rychleji struktury s hrubším rozlišením a systémy s Gaussovským svazkem dominují z hlediska expozičního času v případě jemnějších struktur.

Způsob zápisu motivu litografem Tesla BS600

Systém BS600 pracuje s tvarovaným svazkem (základní informace o systému viz kapitola 1.4). 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 susbrát. Tato druhá úroveň v sobě nese informaci o poloze stolů a velikosti stolů (vychylovacího pole). Třetí úroveň 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:

$$t_{\text{expo}} = \sum_{i=1}^x n_i (T_{i,\text{beam}} + T_{\text{overhead}}) + m T_{\text{stage}}, \quad (11)$$

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 EBP5000+ ES

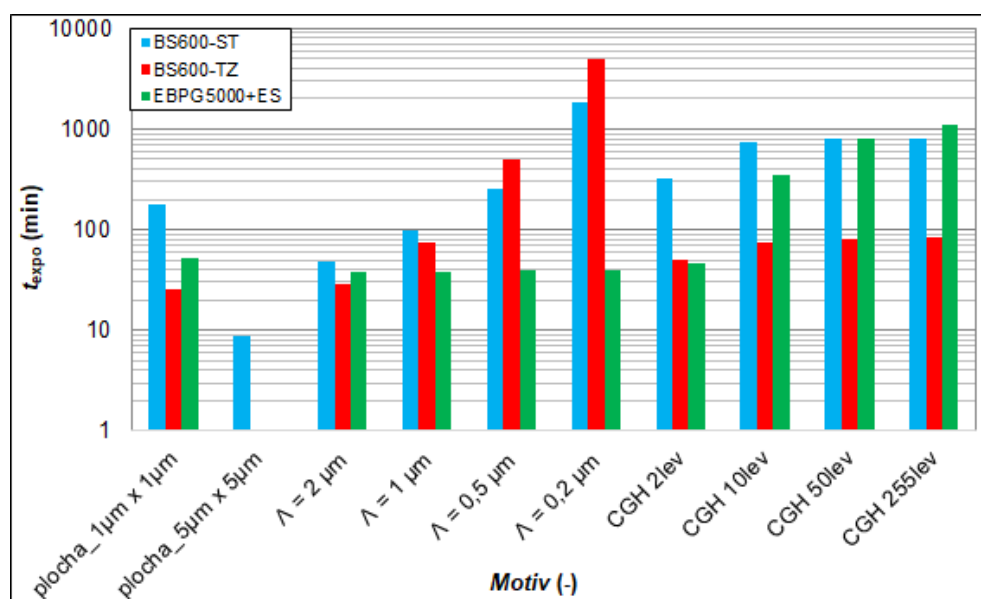
Systém EBP5000+ ES pracuje s Gaussovským svazkem (základní informace o systému viz kapitola 1.4) a princip expozice je jiný. V tomto případě se celý exponovaný motiv dá rozdělit do pěti úrovní – motiv_pole_subpole_trapezoidy_razítka. První úroveň je opět celý exponovaný motiv. Oproti předchozímu systému nese v sobě již první úroveň informací o velikosti stolů, maximální velikosti subpole a rozteč mezi jednotlivými razítky (*BSS* – z anglického *beam step size*). 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 pole 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 [77]. Jeden motiv může obsahovat pouze jednu velikost polí a velikost subpolí, jedno *BSS* a může být použita pouze jedna velikost proudu v primárním svazku – globální nastavení. Rozložení proudové hustoty ve svazku má Gaussovský charakter, proto je nutné dbát na zvýšenou pozornost při volbě *BSS* vůči rozměru stopy použitého svazku, aby se minimalizoval nehomogenní osvit exponované plochy. Jestliže chceme použít různá nastavení v rámci jednoho motivu, musíme jednotlivé části zpracovat samostatně. Oproti systému BS600 je tedy mnohem důležitější zvolit vhodnou strategii zápisu a často se musí volit kompromis mezi dobou zpracování expozičních dat a dobou samotné expozice. Celková expoziční doba jednoho motivu s jedním globálním nastavením může být vyjádřena následovně:

$$t_{\text{expo}} = \sum_{i=1}^x n_i T_{i,\text{beam}} + m T_{\text{sub}} + o T_{\text{trap}} + p T_{\text{stage}} , \quad (12)$$

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 (subpole/trapezoidy). 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 a počítačově generovaný hologram s různým počtem úrovní. Periodická mřížka byla exponována s periodou 2; 1; 0,5 a 0,2 μm . Orientace mřížek (směr linek) byla rovnoběžná s jednou z os systému souřadnic litografu BS600, aby bylo možné využít větší rozměr razítka v jedné ose. Vstupem pro CGH byla bitmapa s rozlišením $1\text{px} = 500\text{ nm}$, výškové úrovně byly zvoleny v počtu 2; 10; 50 a 255. Expoziční dávky na obou systémech byly napočítány tak, aby odpovídaly křivkám citlivosti pro vývojku nAAc uvedeným na obr. 14. Výsledná hloubka pro plně exponovanou plochu a binární mřížku je $\sim 150\text{ nm}$, pro dvouúrovňové CGH $\sim 500\text{ nm}$ a pro víceúrovňové CGH $\sim 1000\text{ nm}$. Pro expozici na systému BS600 byly využity oba dva módy (viz kapitola 1.4) – standardní (ST), technologický zoom (TZ). Pro CGH struktury nebyla využita žádná optimalizace slučování razítek (tzn. 1px odpovídá jednomu razítku). Pro všechny typy struktur se použila velikost stolů $2 \times 2\text{ mm}^2$. V případě systému EBPG5000+ ES byla pro všechny motivy použita hodnota BSS 50 nm, maximální velikost subpole ($\sim 4,5 \times 4,5\text{ }\mu\text{m}^2$) a maximální velikost stolů ($\sim 262 \times 262\text{ }\mu\text{m}^2$). Na obr. 15 jsou uvedeny výsledné expoziční časy zmíněných motivů [85][86]. Pro snadnější srovnání byly jednotlivé časy normovány na plochu expozice 100 mm^2 .



Obr. 15 Srovnání rychlosti expozice systémů BS600 a EBP5000+ ES pro různé typy motivů.

V případě exponované plné plochy je rychlejší systém BS600, jelikož můžeme zvolit větší plochu razítka a tím snížíme čas osvitu i režijní čas (menší počet razítek). Názorně je rozdíl mezi dvěma rozměry razítek ($1 \times 1 \mu\text{m}^2$ a $5 \times 5 \mu\text{m}^2$) vidět ve standardním módu. Přesto že se s TZ módem maximální velikost razítka sníží, tak zvýšení proudové hustoty má za následek celkové zvýšení rychlosti. V případě systému EBP5000+ES bychom mohli zvýšit BSS, nicméně pokud již využíváme maximální použitelný proud v primárním svazku, tak sice klesne počet jednotlivých razítek, ale začne stoupat čas osvitu pro danou expoziční dávku.

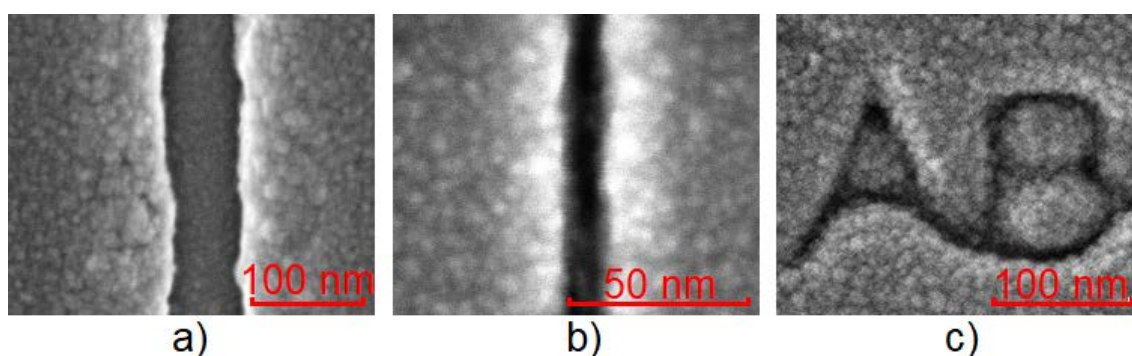
Periodické mřížky jsou velmi vhodný typ motivu pro systém EBP5000+ ES, protože oproti plně exponované ploše klesne celkový čas osvitu. I když mírně naroste počet trapezoidů, tak pro stejnou expoziční dávku je rychlost expozice vyšší. Se snižující se periodou roste expoziční čas pouze velmi mírně, protože se pouze zvyšuje počet trapezoidů v jedné ose, ale plocha osvitu se nemění. Systém BS600 je v tomto případě silně závislý na periodě, kterou má mřížka. Se snižující se periodou klesá rozměr použitého razítka a tím roste jejich počet. Zároveň vzhledem k proximity efektu je v případě nízké energie elektronů v primárním svazku nutné exponovat větší dávkou, což prodlužuje dobu osvitu. Pokud se navíc nemůže využít variabilní rozměr razítka v jednom směru, jak tomu bylo v případě testu u standardního módu, ztrácí se tím velká výhoda systému s tvarovaným svazkem.

Typ motivu CGH je v případě BS600 závislý na počtu razítek, který narůstá s počtem úrovní (největší nárůst expozičního času mezi malým počtem úrovní). Dále expoziční čas roste s rozsahem použitých dávek, ale ne lineárně, protože některá razítka se exponují nižším expozičním časem a některá zase vyšším. TZ mód tedy při stejném počtu razítek těží ze zvýšené proudové hustoty v razítku. Pokud by se navíc využila vhodná optimalizace různých velikostí razítek při přípravě expozičních dat, tak se doba expozice ještě sníží. Tento zisk bude samozřejmě klesat s rostoucím počtem úrovní. V případě systému EBPG5000+ES je expoziční čas pro dvouúrovňový CGH podobný jako pro periodickou mřížku (stejná exponovaná plocha a mírný nárůst počtu trapezoidů kvůli členitosti motivu). Nicméně pokud začne počet úrovní růst, začne členitost motivu narůstat (více trapezoidů), což má společně s různým expozičním časem v rámci motivu zásadní negativní vliv na dobu expozice.

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.

Rozlišení mikrostruktur systémů BS600 a EBPG5000+ ES

Dalším zkoumaným aspektem obou systémů je dosažitelné rozlišení, resp. nejmenší možná velikost exponovaných struktur. To je závislé jak na systémových parametrech (velikost stopy razítka, krok vychylování apod. – viz tabulka 2) a na fyzikálních aspektech (proximity efekt v závislosti na energii elektronů v primárním svazku), tak především na procesních parametrech (rezist, jeho tloušťka a použitá vývojka). Byl připraven test rozlišení pro srovnání obou systémů, který obsahoval samostatné linie o různé šířce, samostatné body a periodické lineární mřížky. Expozice proběhla do velmi tenké vrstvy rezistu PMMA ($h = 50 \text{ nm}$). Parametry expozice pro oba systémy byly voleny pouze s ohledem na výsledné rozlišení (v tomto případě nebyla expoziční data připravena s ohledem na expoziční dobu). Výsledky ukázaly, že oba systémy jsou spolehlivě použitelné pro velikosti struktur do $\sim 100 \text{ nm}$ (viz obr. 16) [87].



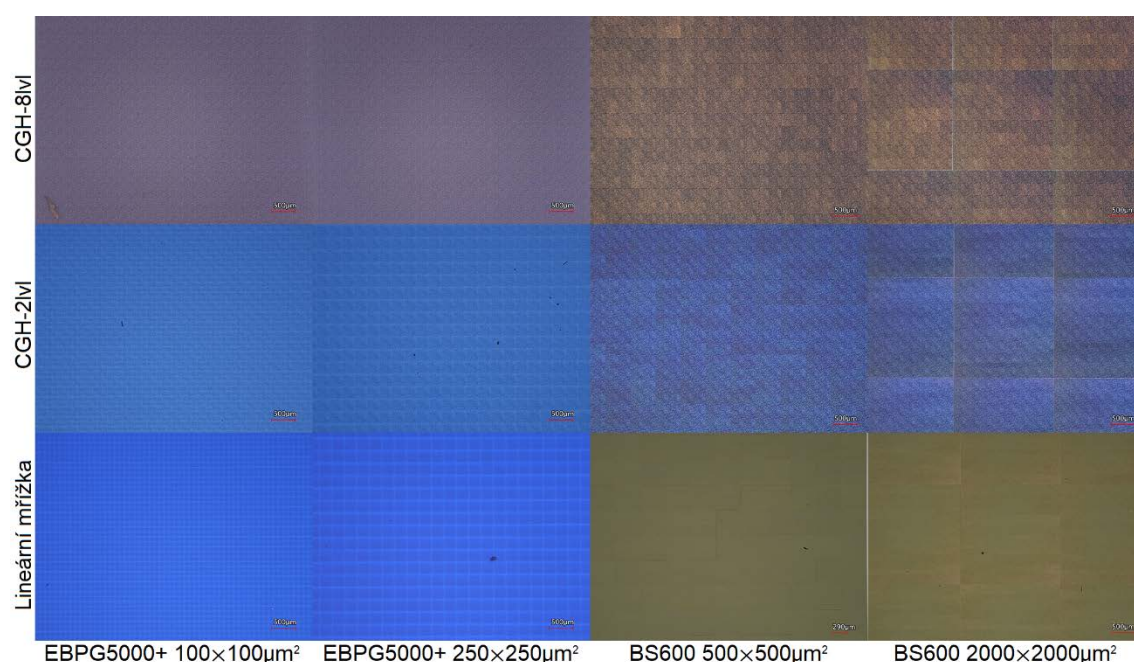
Obr. 16 Nejmenší samostatná linka vytvořená v rezistu PMMA o tloušťce 50 nm pomocí systému BS600 (a), EBPG5000+ ES (b) a nejmenší čitelný text vytvořený v rezistu PMMA o tloušťce 2500 nm (hloubka struktury ~50 nm) pomocí systému EBPG5000+ ES (c).

Jestliže se mají vytvářet struktury s velikostí, která je pod touto hranicí, musí se použít systém EBPG5000+ (viz obr. 16). Přestože systém BS600 dovoluje nastavit stopu razítka menší než zmíněných 100nm, výsledek expozice již není spolehlivý kvůli nestabilitě velikosti stopy a proudové hustoty ve stopě. Podobný test byl ještě pro systém EBPG5000+ proveden ve vrstvě rezistu s tloušťkou 2500 nm kvůli ověření možností reliéfní litografie (motivy se nevyvolaly do dna). Obsahem testu byly tentokrát různé obrazce a textové znaky s různou velikostí. Nejmenší text, který byl ještě čitelný, měl výšku písma ~125 nm s šířkou linky ~10 nm (viz obr. 16) [88].

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 (přesnost polohovatelnosti) a zároveň nehomogenitou osvitu vlivem deformace razítka způsobené vychylováním svazku. Obě nepřesnosti pak přispívají k celkové nedokonalosti optické funkce daného DOE. Je několik možností jak rozeznatelnost expozičních polí potlačit. Čím menší bude expoziční pole, tím menší bude nehomogenita osvitu, nicméně tím neovlivníme danou přesnost navazování. Dále je možné narušit pravidelnost polí změnou jejich velikosti v rámci daného motivu (resp. oblast vychylování, která se použije pro expozici daného pole), ale opět to nebude mít vliv na přesnost navazování a celkovou nehomogenitu motivu. Navíc může být tento způsob expozice z hlediska přípravy

expozičních dat a ovládání daného systému příliš komplikovaný nebo dokonce neproveditelný. Poslední možností je metoda vícenásobné expozice, kdy se každé expoziční pole exponuje několikrát přes sebe, vždy s částečným offsetem, čímž se potlačí nehomogenita osvitu. Tím, že je nepřesnost navazování pro každé pole mírně odlišná, se tak částečně potlačí i tato nedokonalost [57][59][89][90]. Bohužel tato metoda velmi zvyšuje expoziční čas. Tuto metodu je ovšem možné provádět pouze na systémech, které mají velmi přesné polohování stolu, v opačném případě by to mohlo vést k celkové destrukci exponovaného motivu. S rostoucí hloubkou struktury se nehomogenita osvitu více projevuje na výsledné expozici. Navíc v případě reliéfní litografie může být tím pádem v různých částech motivu nehomogenita různě výrazná. Rozeznatelnost polí je ovlivněna i topologií daného motivu a profilem mikrostruktury. Obecně se dá říci, že čím jednodušší je motiv z hlediska topologie (obr. 11) a profilu (obr. 12), tím bude rozeznatelnost polí výraznější. Systém EBPG5000+ ES 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+ ES je snadnější zavádět variace ve velikosti expozičního pole pro jeden motiv. Na obr. 17 je uvedeno srovnání rozeznatelnosti expozičních polí pro oba systémy a různé typy motivů.



Obr. 17 Srovnání rozeznatelnosti expozičních polí různých velikostí pro systémy EBPG5000+ ES a BS600. Motivy – lineární periodická mřížka, dvouúrovňové CGH a osmiúrovňové CGH.

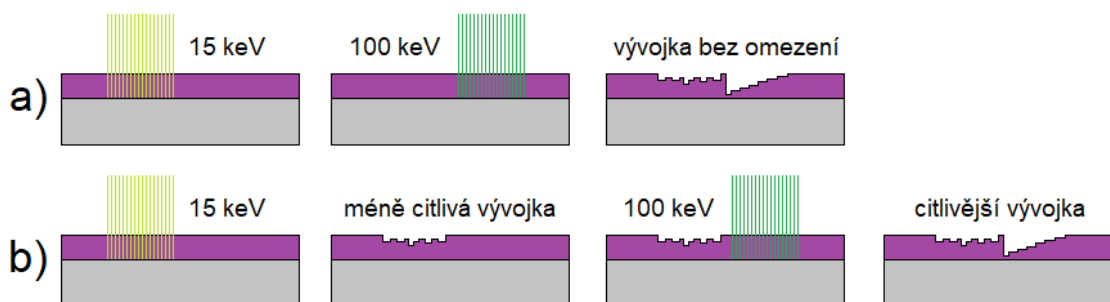
3.1.3 Metoda kombinace expozic pomocí dvou systémů

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. 18). 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. 18 Metoda kombinované elektronové litografie pro simultánní vyvolání motivů (a) a sekvenční vyvolání motivů (b).

Test sekvenčního vyvolání motivů

Podle křivek citlivosti uvedených na obr. 14 byl připraven test sekvenčního vyvolávání, aby se ukázalo, do jaké míry bude výsledek první expozice ovlivněn vyvoláním druhé expozice. Test obsahoval struktury s různou hloubkou (expoziční dávkou) a byl vyvolán citlivější vývojkou (nAAc). Hloubky všech struktur byly změřeny pomocí mikroskopu atomárních sil (AFM z anglického *atomic force microscope*). Následně se provedlo máčení v méně citlivé vývojce (IPA+H₂O), které simulovalo vyvolání druhé expozice. Po druhém kroku vyvolání byly všechny struktury opět změřeny na AFM. I když se předpokládá, že první expozice bude provedena na systému s energií elektronů v primárním svazku 15 keV, test byl proveden i na systému s energií elektronů v primárním svazku 100 keV. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4 Výsledky testu sekvenčního vyvolání pro systém s energií elektronů v primárním svazku 15 keV a 100 keV.

Struktura	Tesla BS600		Raith EBPG 5000+ ES	
	h_{nAAc} (nm)	h_{IPA+H_2O} (nm)	h_{nAAc} (nm)	h_{IPA+H_2O} (nm)
2lvl mřížka $\lambda = 1,6 \mu m$ h_1	147 ± 10	162 ± 12	113 ± 5	122 ± 4
2lvl mřížka $\lambda = 1,6 \mu m$ h_2	169 ± 13	159 ± 15	147 ± 8	171 ± 7
2lvl mřížka $\lambda = 1,6 \mu m$ h_3	360 ± 20	340 ± 20	259 ± 11	245 ± 11
2lvl mřížka $\lambda = 1 \mu m$ h_1	113 ± 15	124 ± 8	115 ± 5	123 ± 5
2lvl mřížka $\lambda = 1 \mu m$ h_2	160 ± 8	178 ± 12	148 ± 7	166 ± 8
2lvl mřížka $\lambda = 1 \mu m$ h_3	230 ± 24	228 ± 17	261 ± 11	254 ± 11
8lvl mřížka $\lambda = 8 \mu m$ h_1	134 ± 10	126 ± 12	560 ± 20	540 ± 20
8lvl mřížka $\lambda = 8 \mu m$ h_2	214 ± 42	231 ± 35	1070 ± 50	1110 ± 50
8lvl mřížka $\lambda = 8 \mu m$ h_3	500 ± 100	560 ± 70	1440 ± 50	1390 ± 40
8lvl mřížka $\lambda = 16 \mu m$ h_1	172 ± 29	170 ± 28	530 ± 20	570 ± 20
8lvl mřížka $\lambda = 16 \mu m$ h_2	420 ± 60	440 ± 70	1100 ± 40	1130 ± 40
8lvl mřížka $\lambda = 16 \mu m$ h_3	520 ± 90	540 ± 60	1380 ± 40	1410 ± 40

Z výsledků vyplývá, že změna hloubky mikrostruktury po druhém kroku vyvolání vývojkou IPA+H₂O není jednoznačná. U systému BS600 to může být dáno velkým rozptylem měřených hloubek, což souvisí s celkovou nehomogenitou a nestabilitou systému. V případě systému EBPG5000+ ES, kde se předpokládá vyšší homogenita expozice a stabilita systému, se dá u méně hlubokých struktur pozorovat mírný nárůst hloubky. Ovšem u hlubších struktur, kde by se dalo předpokládat, že změna hloubky bude vyšší, to naopak vypadá, že hloubka struktur se snížila. To může být způsobeno (u obou systémů) celkovým poklesem struktury v rámci rezistové vrstvy namísto jejího prohloubení. Tento jev začne v určitých hloubkách pro danou kombinaci rezistu a vývojky (dále to je ovlivněno expoziční dávkou, teplotou při vyvolání, způsobem vyvolání apod.) převládat nad prohlubováním struktury a může tedy navíc docházet ke snižování hloubky struktury.

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. Motiv byl připraven tak, aby byl osově symetrický, kdy každá část je připravena pomocí jednoho systému. Stejný motiv byl použit pro obě dvě metody – simultánní a sekvenční vyvolání. Grafický design motivu je znázorněn na obr. 19.



Obr. 19 Grafický design motivu demonstrujícího možnosti metody kombinované elektronové litografie.

Jednotlivé expozice byly vůči sobě sesouhlaseny pomocí Au značek připravených technikou lift-off. Značky byly umístěny mimo hlavní motiv, aby rastrování elektronového svazku přes značky neovlivňovalo výsledek expozice. Soukryt motivu vůči značkám v systému BS600 probíhal ručně pomocí SEM módu litografu, protože v tomto systému může probíhat automatizovaný soukryt pouze v případě, že jsou značky přítomny pro každý jednotlivý pojezd stolu [91]. To by ovšem znamenalo lokální destrukci exponovaného motivu. Situace by se dala řešit vhodným zakomponováním této rastrované oblasti do grafického designu. Soukryt pro systém EBPG5000+ ES probíhal automatizovaně, protože tento systém nevyžaduje soukrytovací značky pro každý pojezd stolu [92]. V případě simultánního vyvolání se nejdříve provedla expozice na systému BS600 a následně na systému EBPG5000+ ES. Vyvolání proběhlo pomocí vývojky nAAc. Sekvenční vyvolání mělo shodné pořadí expozic jako simultánní variant. První expozice se vyvolala pomocí vývojka IPA+H₂O a druhá expozice se vyvolala pomocí vývojky nAAc. Na obr. 20 jsou uvedeny snímky z výsledného motivu pro obě varianty metody kombinované elektronové litografie. Další snímky jsou v příloze B. 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. 20 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.

3.1.4 Diskuze

Byla navržena a odladěna metoda kombinované elektronové litografie využívající zápis pomocí litografických systémů s dvěma různými energiemi elektronů v primárním svazku v rámci jedné rezistové vrstvy. Slouží jako nástroj k efektivnější přípravě komplexních velkoplošných DOE pomocí reliéfní litografie. Navrženy byly dva postupy – simultánní a sekvenční vyvolání motivu. V případě simultánního vyvolání motivu se expozice z jednotlivých systémů vyvolají v jednom kroku. Vystačí se tak s jedinou křivkou plošné citlivosti pro každý systém a s jedinou vývojkou. Nicméně jsou kladeny zvýšené nároky na sladění obou expozic. Sekvenční vyvolání motivu umožňuje zpracovat expozice nezávisle na sobě. Při správné volbě vývojek umožňuje lépe naladit hloubky mikrostruktur jednotlivých expozic. Metoda byla publikována v [93].

V konkrétní konfiguraci kombinující systém Tesla BS600 a Raith EBPG5000+ ES, pro kterou byla metoda testována, se projevují především nedostatky systému BS600 dané jeho zastaralostí. Nedostatky tohoto systému jsou především nepřesnost polohování pojezdu jednotlivých stolů a časová nestabilita tvaru exponovaného razítka a jeho proudové hustoty. To má negativní dopad na homogenitu výsledných expozic, která se snižuje s časovou

náročností expozice daného motivu. V této konkrétní konfiguraci je tedy přínos navržené metody diskutabilní.

Obecně by ovšem metoda mohla přinést výhodu na straně expozičních systémů s nastavitelnou hodnotou urychlovacího napětí. Rozdíl nastavitelných energií musí být ovšem dostatečný (např. 100 keV a 20 keV) k využití rozdílných parametrů rozptylových jevů při interakci elektronového svazku s rezistem.

Další možností je využití elektronového litografu pracujícího s vysokou hodnotou urychlovacího napětí v kombinaci s rastrovacím elektronovým mikroskopem disponujícím nástavbou umožňující provádět expozice. V posledním zmíněném případě se dá ovšem předpokládat, že metoda narazí na efektivitu časové náročnosti takových expozic. V tomto ohledu tedy může diskutovaná metoda ztrácet smysl.

Největším přínosem se tedy prozatím jeví ta varianta metody sekvenčního vyvolání, kdy se expozice provede pouze jedním systémem. Tato metoda usnadňuje možnosti ladění při přípravě komplexních DOE obsahujících mikrostruktury s různými tvary profilů a s různou hloubkou profilů. Nezávislé vyvolání jednotlivých motivů klade nižší nároky na přesnost aplikovaných PEC. Úspěšně se využívá v rámci smluvního výzkumu týkajícího se přípravy masterů bezpečnostních hologramů na expozičním systému Raith EBPG5000+ ES.

3.2 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.

3.2.1 Vliv optimalizace vstupních obrazových dat na rychlost přípravy expozičních dat a na 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. Vzhledem ke způsobu výpočtu těchto vstupních dat a dále pak k přenositelnosti na jiné typy zařízení to může být často jediný vhodný způsob zadání expozice. 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 (viz. kapitola 3.1.2), 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 pravouhlém rastru, ale pod jakýmkoliv úhlem. To umožňuje vektorové zadávání struktur, které ovšem nemusí být vždy kompatibilní se způsobem přípravy vstupů definujících mikrostrukturu. Vektorové zadání topologie motivu způsobí, že totožný motiv obsahuje nižší počet trapezoidů, což zrychlí přípravu expozičních dat (i celková velikost souboru je nižší) a může to i zkrátit dobu samotné expozice.

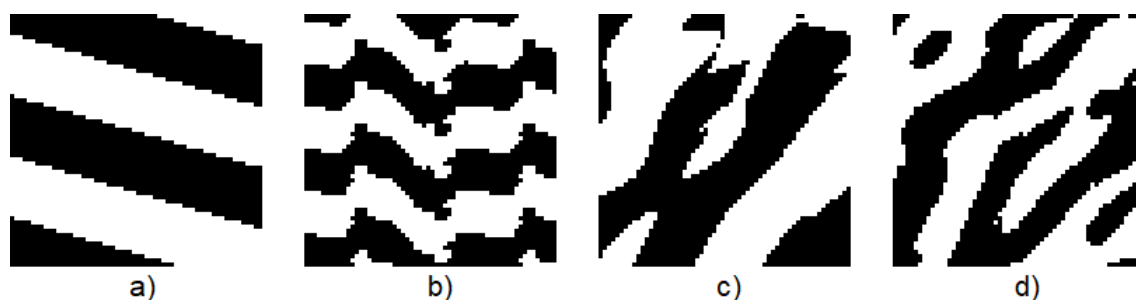
Popis použitého optimalizačního algoritmu

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 asymetricky umístěnými 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“) [94][95].

Na obr. 21 jsou uvedeny detaily vstupních bitmap čtyř prvních testovaných DOE. Jednotlivé vstupní bitmapy byly vygenerovány v rozlišení $1 \text{ px} = 50 \text{ nm}$, $1 \text{ px} = 100 \text{ nm}$ a $1 \text{ px} = 200 \text{ nm}$. Velikost motivu na jedné bitmapě byla zvolena $1000 \times 1000 \text{ } \mu\text{m}^2$, čemuž odpovídají velikosti bitmap pro uvedená rozlišení $20000 \text{ px} \times 20000 \text{ px}$, $10000 \text{ px} \times 10000 \text{ px}$ a $5000 \text{ px} \times 5000 \text{ px}$. Velikost testovaného motivu pro jednotlivé typy DOE byla shodná $5 \times 5 \text{ mm}^2$.

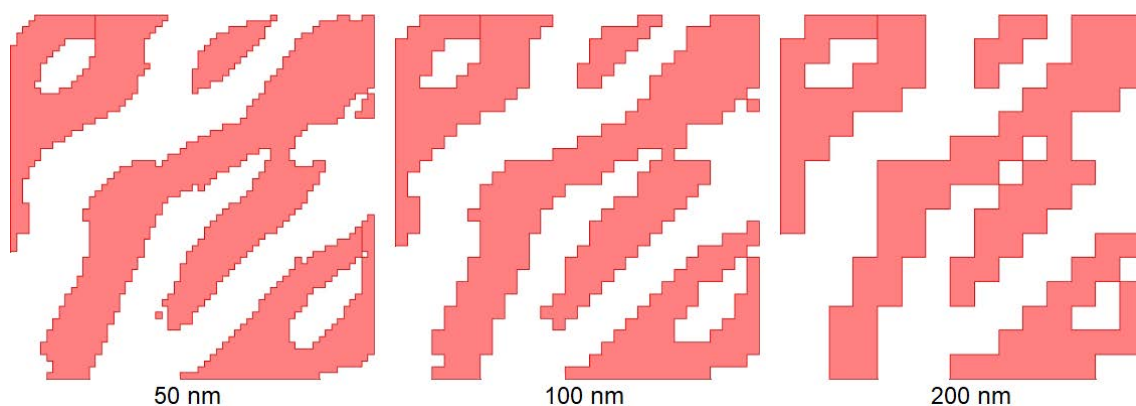


Obr. 21 Detail části vybraných vstupních bitmap ($3 \times 3 \text{ } \mu\text{m}^2$), rozlišení $1 \text{ px} = 50 \text{ nm}$, a) BS-2, b) BS-6, c) CGH-40°, d) CGH-60°.

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

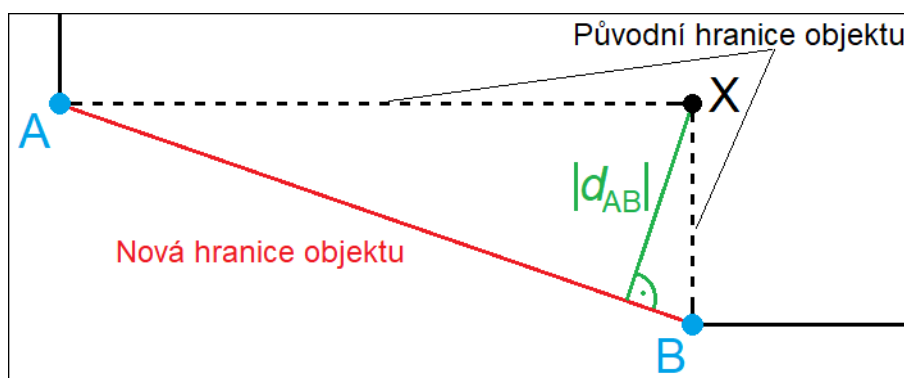
- 1) import vstupních bitmap, odstranění hranic mezi jednotlivými pixely uvnitř mikrostruktury a umístění bitmap na správnou pozici,
- 2) optimalizace vstupních bitmap (v tomto případě modifikace hranic objektů),
- 3) generování expozičních dat pro daný litograf.

Na obr. 22 je uveden výřez vstupních bitmap pro motiv CGH-60° (podle obr. 21d) pro různá rozlišení po importu a odstranění vnitřních hranic mezi jednotlivými pixely.



Obr. 22 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.



Obr. 23 Znáznornění algoritmu modifikujícího hranice objektů aplikovaného na vstupní bitmapy.

Na obr. 23 je naznačen optimalizační algoritmus použitý v GenISys BEAMER [76]. Z hranice objektu se odstraní každý hraniční bod, který splňuje následující podmínku:

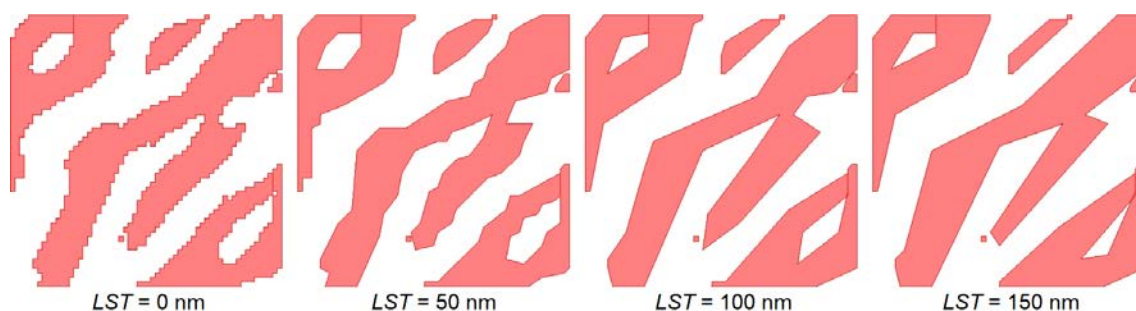
$$|d_{AB}| \leq LST, \quad (13)$$

kde $|d_{AB}|$ je vzdálenost vyhodnocovaného bodu od spojnice mezi jeho dvěma sousedními body, LST (z anglického *layout smoothing tolerance*) 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. Vzhledem k tomu, že optimalizační algoritmus pouze odstraňuje některé body, ale nevytváří nové, tak minimální hodnota parametru LST , kterou má smysl zadávat v závislosti na použitém rozlišení vstupní bitmapy, se dá vyjádřit následovně:

$$LST \geq a_{px} \frac{\sqrt{2}}{2}, \quad (14)$$

kde a_{px} je rozlišení jednoho pixelu vstupní bitmapy. Velikost parametru LST byla pro jednotlivá rozlišení vstupních bitmap volena tak, aby se projevila různá úroveň optimalizace na testovaných motivech. Na obr. 24 je uveden výsledek optimalizace na vybrané vstupní bitmapě s rozlišením 1 px = 50 nm pro různé hodnoty LST . Další příklady výsledků optimalizace vstupních bitmap s jiným rozlišením jsou uvedeny v příloze C.



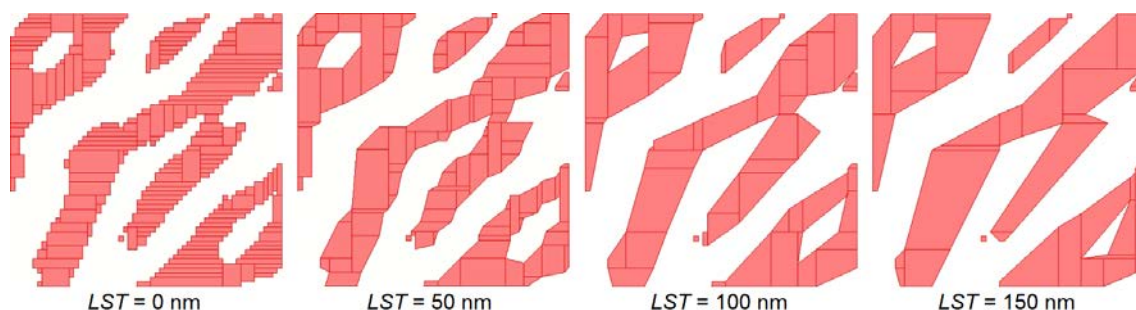
Obr. 24 Výsledek optimalizace vybraných vstupních bitmap s rozlišením 1 px = 50 nm pro různé hodnoty LST . Motiv CGH-60°.

Vzhledem k tomu, že se každý objekt vyhodnocuje nezávisle na ostatních, není tento způsob optimalizace možné aplikovat na víceúrovňové struktury, kde na sebe jednotlivé úrovně přímo navazují. Změnou topologie mikrostruktury by totiž mohla vzniknout místa, která by se vůbec neexponovala, nebo která by byla přexponovaná. Nicméně v určitých aplikacích, kde je požadována určitá míra šumu (achromatické DOE, difuzéry apod.), by tyto artefakty ve struktuře mohly být žádoucí.

Generování expozičních dat pro systém Raith EBPG5000+ ES

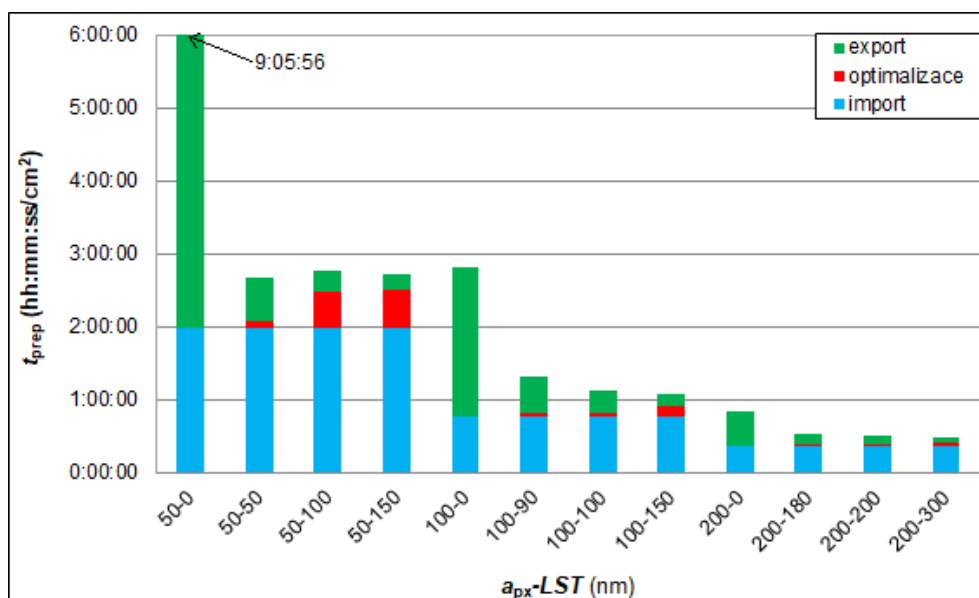
Expoziční data všech testovaných variant byla vygenerována s identickým nastavením. Velikost pojezdů stolů byla 198 μm , velikost subpolí 4,5 μm , BSS = 50 nm a byla zvolena stejná strategie zápisu, aby bylo možné přímo porovnat jednotlivé varianty vyhlazení. Na

obr. 25 je uvedeno, jak se změni expoziční data motivu *CGH-60°* po aplikaci různé míry optimalizace na vstupní bitmapu s rozlišením 1 px = 50 nm. V příloze D jsou uvedeny příklady s jiným rozlišením vstupní bitmapy.



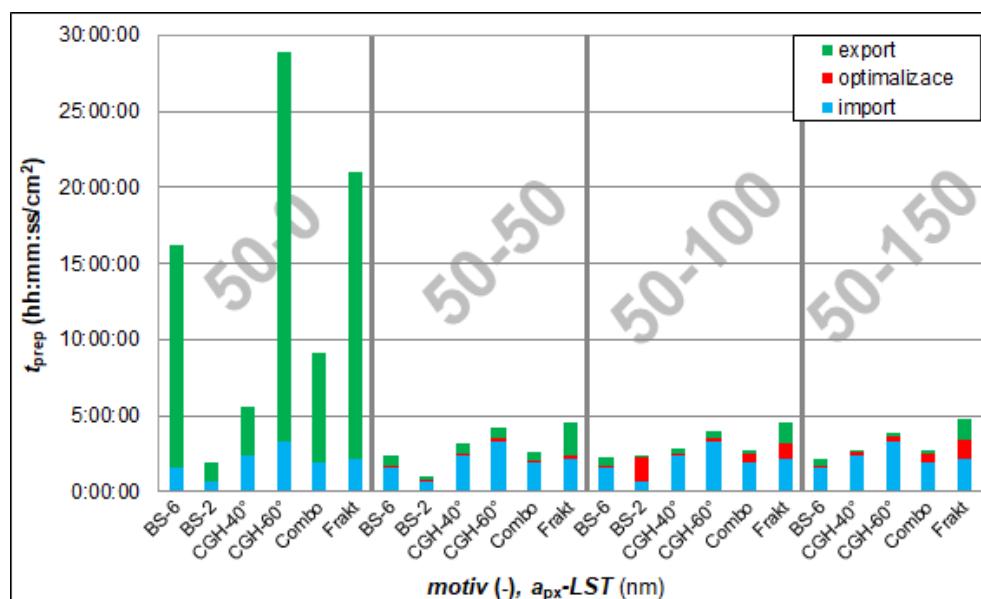
Obr. 25 Vnitřní struktura expozičních dat po aplikaci různé míry optimalizace na vstupní bitmapu s rozlišením 1 px = 50 nm. Motiv *CGH-60°*.

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

Na obr. 26 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 převládá 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. Nicméně snížení časové náročnosti přípravy expozičních dat nemusí platit pro všechny typy motivů, jak naznačuje obr. 27, kde jsou srovnány různé typy motivů pro totožná rozlišení vstupních bitmap a totožné hodnoty *LST*. Kompletní výsledky pro zbylé testovací motivy jsou uvedeny v příloze E.

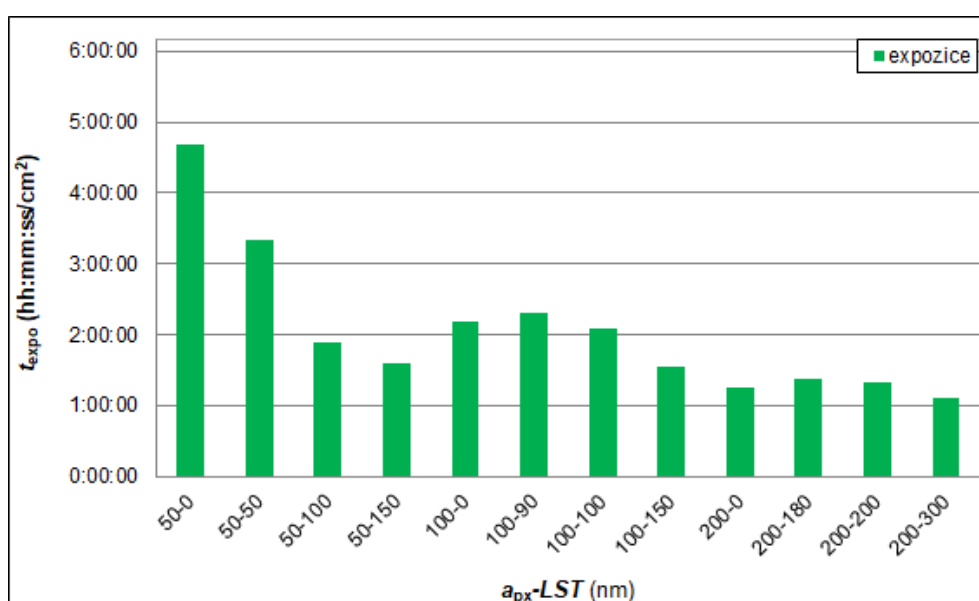


Obr. 27 Srovnání doby přípravy expozičních dat pro vstupní rozlišení bitmap 1 px = 50 nm a různou mírou optimalizace pro různé typy motivů.

Expozice testovaných motivů

V případě změny expoziční doby v závislosti na míře optimalizace se ještě více projevuje vliv typu motivu a rozlišení vstupních bitmap v relaci s velikostí BSS. Obr. 28 ukazuje, že

k jednoznačnému zrychlení expozice dochází pouze v případě vysokého rozlišení vstupních bitmap. Bitmapy s nižším rozlišením již nemají zaručeno, že se s optimalizací sníží počet trapezoidů. 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. To vše může mít následně vliv na prodloužení expoziční doby i přesto, že na straně přípravy expozičních dat došlo ke zrychlení (např. motiv *combo*, 1 px = 100 nm, $LST = 90$ nm).

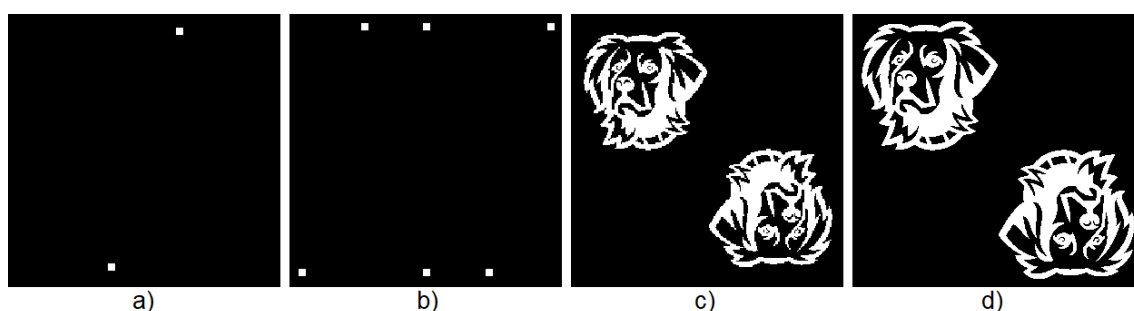


Obr. 28 Srovnání expoziční doby motivu s různým rozlišením vstupních bitmap a různou mírou optimalizace. Motiv *combo*.

V příloze F je uvedeno srovnání expoziční doby pro ostatní typy testovaných motivů. 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.

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

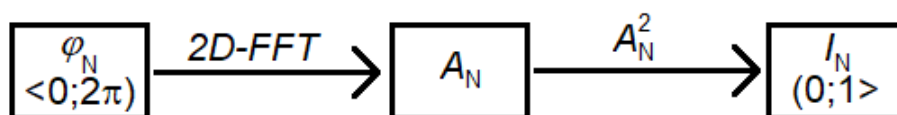
Jak již bylo uvedeno výše, velká míra optimalizace může zásadně změnit topologii DOE, což může mít vliv na požadovanou optickou funkci. Čtyři testované motivy (*BS-2*, *BS-6*, *CGH-40°*, *CGH-60°*) byly připraveny pomocí metody *IFTA* – iterativní algoritmus Fourierovy transformace. Detail signálu použitého jako vstup pro výpočet obrazu je uveden na obr. 29. Logo použité jako vstup pro výpočet obrazu *CGH-40°* a *CGH-60°* bylo převzato z [96].



Obr. 29 Signál použitý pro výpočet jednotlivých mikrostruktur (obrazů) pomocí metody *IFTA*. *BS-2* (a), *BS-6* (b), *CGH-40°* (c), *CGH-60°* (d).

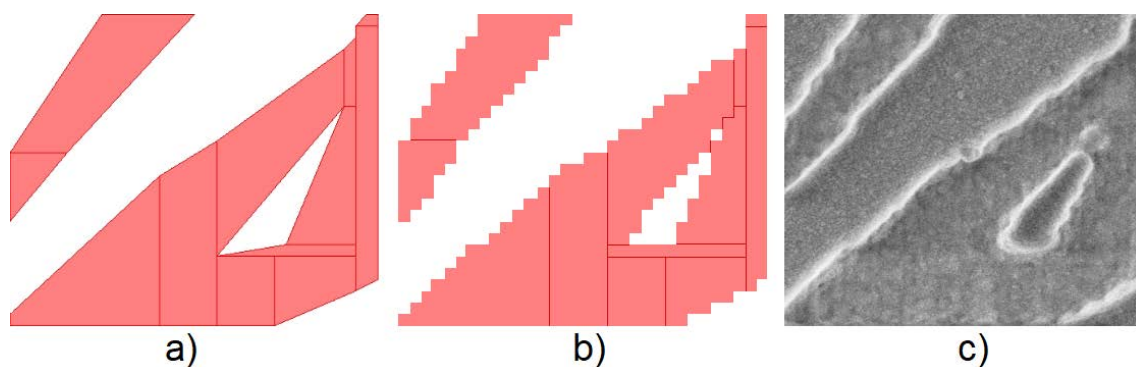
Rekonstrukce signálu z fázové složky obrazu pomocí *2D-FFT*

U čtyř výše zmíněných DOE může být provedena rekonstrukce optimalizované mikrostruktury nesoucí fázovou složku obrazu a výsledný signál může být srovnán s neoptimalizovanou variantou. Na obr. 30 je uvedeno schéma výpočtu rekonstrukce signálové předlohy A_N (amplituda signálu) z dvouúrovňové struktury φ_N , která v sobě nese fázovou složku obrazu a přepočet na intenzitní mapu I_N (normovaná vůči celkové intenzitě – 100 % signálu), aby mohla být následně srovnána s měřením účinnosti difrakčních řádů pro vybrané varianty testovaných DOE.



Obr. 30 Schéma algoritmu rekonstrukce signálu z fázové složky obrazu pomocí *2D-FFT*.

Srovnávají 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. I když jsou trapezoidy vyhlazených variant zdánlivě v nekonečně velkém rozlišení, pro expozici jsou vyplněny jednotlivými záblesky v zadaném rozlišení (v tomto případě hodnota BSS), jak bylo popsáno v kapitole 3.1.2. Na obr. 31 je uvedeno srovnání topologie expozičních dat s naznačenými hranicemi skutečně exponovaných záblesků (jeden záblesk je rovný jednomu pixelu) s ekvivalentem naexponované a vyvolané mikrostruktury. Přesto že elektronový svazek má kruhovou stopu, některé hranice objektů po jednotlivých záblescích jsou stále patrné. Další snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu (dále jen SEM) pro jiná rozlišení vstupních bitmap (100 nm a 200 nm) jsou uvedeny v příloze G.



Obr. 31 Srovnání topologie expozičních dat (a) se skutečnou topologií jednotlivých záblesků (b), s výsledkem skutečné expozice (c), snímek SEM, velikost výřezu 1,60×1,35 μm². Motiv CGH-60°, vstupní rozlišení bitmap 1 px = 50 nm, LST = 150 nm.

Z teoretických modelů se vyhodnotí parametry uvedené v kapitole 1.5. Celková účinnost užitečných difrakčních řádů η_{ef} podle vztahu 7. U motivů BS-2 a BS-6, kde je malý počet užitečných difrakčních řádů, budou vyhodnoceny i účinnosti jednotlivých užitečných difrakčních řádů, které se dají vyjádřit jako:

$$\eta_k = \frac{I_k}{\sum_{i=0}^n I_i} \cdot 100\%, \quad (15)$$

kde η_k je difrakční účinnost daného užitečného difrakčního řádu, I_k je intenzita daného užitečného difrakčního řádu a I_i je intenzita jednotlivých difrakčních řádů (užitečných i parazitních). Dále bude vyhodnocena homogenita užitečných difrakčních řádů H podle vztahu 8, *stray-light* η_s podle vztahu 9, v tomto případě vyjma nultého řádu, který bude vyhodnocen zvlášť podle vztahu 10. Vzhledem k nízké hodnotě parametru *stray-light* vztažené k celkové intenzitě všech difrakčních řádů pro některé motivy bude vyhodnocena i ve vztahu k nejintenzivnějšímu užitečnému difrakčnímu řádu:

$$\eta_{s\text{-ef}} = \frac{I_{s,\max}}{I_{k,\max}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

kde $\eta_{s\text{-ef}}$ je intenzita nejsilnějšího parazitního difrakčního řádu $I_{s,\max}$ vztažená k intenzitě nejsilnějšího užitečného difrakčního řádu $I_{k,\max}$.

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

V tabulce 5 jsou uvedeny teoreticky vypočítané hodnoty parametrů η_{ef} , H , η_0 , η_s a $\eta_{s\text{-ef}}$ pro testované motivy a různé míry optimalizace pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm. V příloze H jsou uvedeny výsledky pro další rozlišení vstupních bitmap (1 px = 100 nm a 1 px = 200 nm).

Tab. 5 Srovnání teoretických hodnot parametrů η_{ef} , H , η_0 , η_s a $\eta_{s\text{-ef}}$ 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 (%)	$\eta_{s\text{-ef}}$ (%)
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. V souvislosti s malou změnou celkové účinnosti užitečných difrakčních řádů to znamená, že dochází především k přelévání účinnosti mezi jednotlivými užitečnými difrakčními řády. To potvrzuje i účinnost jednotlivých difrakčních řádů v tabulce 6. 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.

V tabulce 6 jsou uvedeny teoreticky vypočítané hodnoty účinností užitečných difrakčních řádů pro motivy BS-2 a BS-6 pro různou míru optimalizace a pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm. V příloze H jsou uvedeny výsledky pro další rozlišení vstupních bitmap (1 px = 100 nm a 1 px = 200 nm).

Tab. 6 Teoretické hodnoty účinností užitečných difrakčních řádů pro motivy BS-2 a BS-6 pro různou míru optimalizace a rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.

Motiv	LST (nm)	η_{III} (%)	η_{II} (%)	η_I (%)	η_I (%)	η_{II} (%)	η_{III} (%)
BS-2	0			40,53	40,53		
	50			40,28	40,28		
	100			40,04	40,04		
BS-6	0	9,59	12,71	10,70	10,70	12,71	9,59
	50	10,02	12,26	10,02	10,02	12,26	10,02
	100	11,14	12,60	7,38	7,38	12,60	11,14
	150	11,09	12,30	5,85	5,85	12,30	11,09

Pozn.: V případě struktury BS-6 je označení I., II., III. difrakční řád pouze rozlišovací, ale neznačí skutečný 1., 2., 3. difrakční řád dané struktury.

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:

$$\eta_{\text{ef}} = \frac{\sum_{k=1}^n I_k}{I_{\text{in}}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

kde I_{in} je intenzita 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 nultého difrakčního řádu η_0 a užitečných difrakčních řádů η_k se dá vyjádřit jako:

$$\eta_0 = \frac{I_0}{I_{\text{in}}} \cdot 100\%, \quad (18)$$

$$\eta_k = \frac{I_k}{I_{\text{in}}} \cdot 100\%. \quad (19)$$

Účinnost nejsilnějšího parazitního difrakčního řádu η_s vyjma nultého řádu se pro měření na vytvořených strukturách dá vyjádřit jako:

$$\eta_s = \frac{I_{s\text{max}}}{I_{\text{in}}} \cdot 100\%. \quad (20)$$

$\eta_{s\text{-ef}}$ má stejnou definici jako v případě teoretického výpočtu. Měření probíhalo na poloautomatické měřicí stanici, kde světelným zdrojem je laserová dioda $\lambda = 532 \text{ nm}$ [97]. 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. Motiv *combo* byl připraven jako kombinace čtyř zmíněných motivů pouze pro ilustraci zpracování dat bezpečnostního hologramu obsahujícího

různé typy struktur a vyhodnocován proto nebude. Poslední motiv *frakt* nebyl připraven ze signálové předlohy, ale jako matematicky generovaný obraz, proto budou vyhodnoceny pouze vizuální změny optického vjemu skutečných expozic na optimalizovaných variantách vůči neoptimalizovaným.

Jednotlivé motivy byly naexponovány do rezistu PMMA (tloušťka ~2500 nm) na křemíkové podložce. Vyvolání vývojkou nAAc probíhalo tak, aby byla co nejbližše dosažena hloubka rovna $\frac{1}{4} \lambda$ použitého laserového zdroje jakožto ideální hloubka pro měření reflexních difrakčních řádů (podle výsledků simulací uvedených v příloze A). Výsledný vzorek byl pokoven vrstvou 100nm Ag, aby byla dosažena co nejvyšší odrazivost. V tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty parametrů η_{ef} , H , η_0 , η_s a η_{s-ef} vypočítané z naměřených intenzit difrakčních řádů motivů BS-2 a BS-6 pro různou míru optimalizace a pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm. V tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty účinností užitečných difrakčních řádů vypočítané z naměřených intenzit difrakčních řádů pro motivy BS-2 a BS-6 pro různé úrovně vyhlazení a pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm. Naměřené výsledky pro další rozlišení vstupních bitmap (1 px = 100 nm a 1 px = 200 nm) jsou uvedeny v příloze I.

Tab. 7 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

Tab. 8 Naměřené hodnoty účinností užitečných difrakčních řádů pro motivy BS-2 a BS-6 pro různou míru optimalizace a rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.

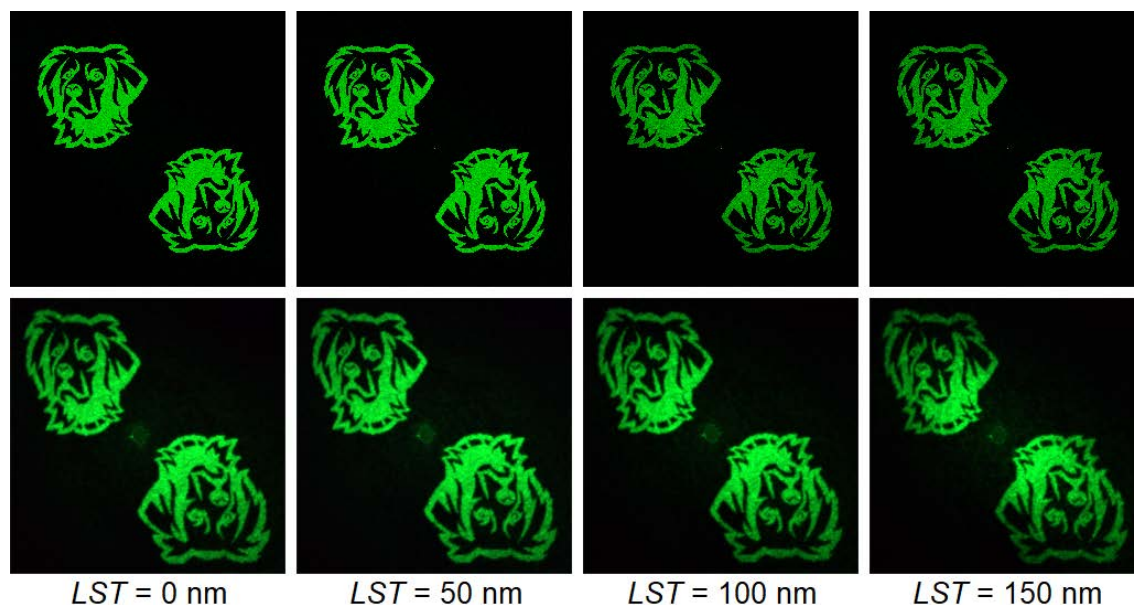
Motiv	LST (nm)	η_{III} (%)	η_{II} (%)	η_I (%)	η_I (%)	η_{II} (%)	η_{III} (%)
BS-2	0			39,8	39,1		
	50			39,6	39,9		
	100			41,4	40,7		
BS-6	0	10,4	14,2	16,7	14,5	13,7	6,5
	50	11,4	13,4	16,4	15,0	12,6	7,7
	100	14,0	13,9	10,1	9,1	12,0	12,2
	150	12,9	10,4	6,7	6,7	10,3	12,5

Pozn.: V případě struktury BS-6 je označení I., II., III. difrakční řád pouze rozlišovací, ale neznačí skutečný 1., 2., 3. difrakční řád dané struktury.

Naměřené hodnoty účinností jednotlivých difrakčních řádů vykazují 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. Dále u motivu *BS-6* je patrné přelévání hodnot difrakčních účinností užitečných řádů. To může být způsobeno 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 5) 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. Navíc hodnota difrakční účinnosti nultého difrakčního řádu vykazuje vzhledem k míře optimalizace opačný trend než teoretické výsledky. Může to být způsobeno přeléváním energie do jiných difrakčních řádů, které právě optimalizace způsobila. To indikuje i zvýšení účinnosti parazitních difrakčních řádů ve větší míře než u teoretických výsledků. 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. 32 je uvedeno srovnání teoretických intenzitních map se snímky rekonstruovaných signálů exponovaných motivů pro motiv *CGH-40°* pro různé úrovně vyhlazení pro rozlišení vstupních bitmap $1 \text{ px} = 50 \text{ nm}$. Srovnání pro další rozlišení a motiv *CGH-60°* je uvedeno v příloze J. Intenzita nultého difrakčního řádu byla na teoretických obrazech uměle snížena na intenzitu druhého nejintenzivnějšího difrakčního řádu, aby byly lépe patrné i další difrakční řády (vyjma neoptimalizované varianty by ostatní difrakční řády měly mnohem nižší intenzitu než nultý řád a těžko by tak mohly být jednotlivé varianty porovnány). Na snímcích rekonstruovaných signálů exponovaných motivů se vzhledem ke způsobu měření nultý řád nevyskytuje (stínítko pro snímání obrazu obsahovalo výřez pro průchod dopadajícího svazku a ten byl v zákrytu s odraženým nultým difrakčním řádem). Snímky rekonstruovaných signálů

motivu *CGH-60°* obsahují vzhledem k možnostem měřicí aparatury pouze jednu polovinu signálu. Již tak je patrné velké zkreslení obrazu vzhledem ke směřování signálu do vysokých úhlů.

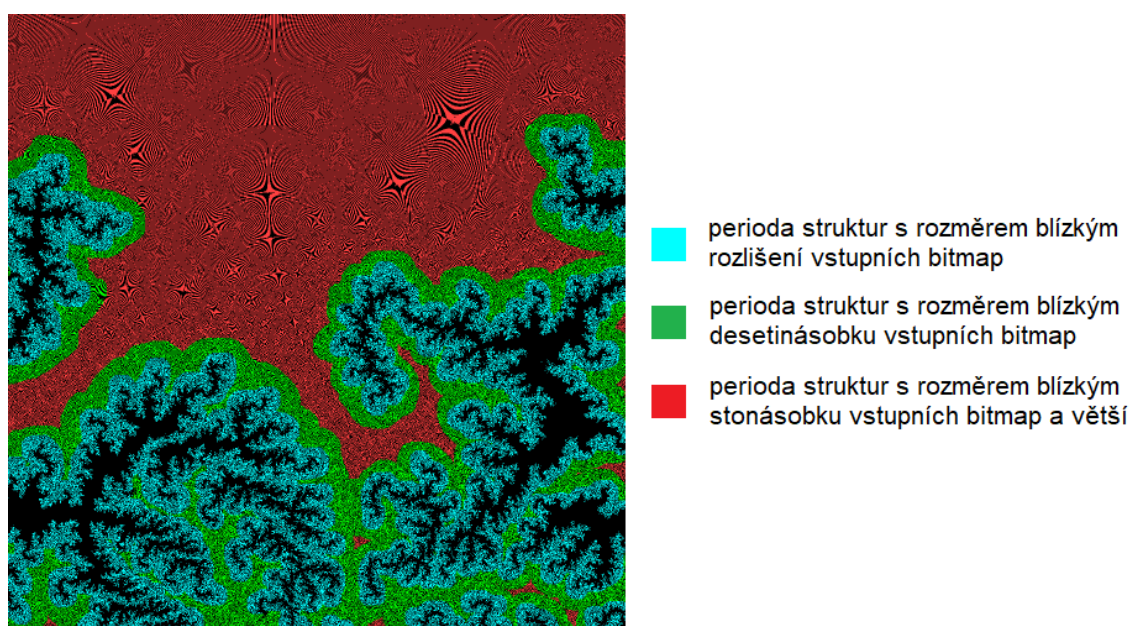


Obr. 32 Srovnání teoretických intenzitních map – signálu (nahore) se snímky rekonstruovaných signálů skutečně exponovaných struktur (dole) motivu *CGH-40°* pro různou míru optimalizace a rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm.

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.

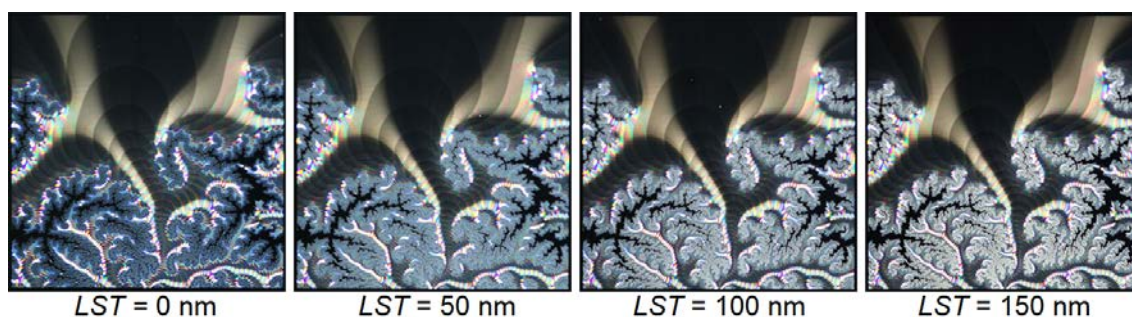
Vyhodnocení vlivu optimalizace na optický vjem motivu frakt

Motiv *frakt* byl exponován společně s výše uvedenými motivy. Z pohledu topologie nelze tento motiv jednoduše popsat. Na obr. 33 jsou naznačeny oblasti popisující zevrubně motiv z pohledu velikosti period ve vztahu k rozlišení obrazového vstupu.



Obr. 33 Topologie motivu *frakt* podle velikosti period struktur ve vztahu k rozlišení vstupních bitmap.

Na obr. 34 je uvedeno několik snímků motivu *frakt* pod stejným úhlem nasvícení pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm a pro různou míru optimalizace. Další snímky pro různá rozlišení vstupních bitmap jsou uvedeny v příloze K.



Obr. 34 Snímky motivu *frakt* pod stejným úhlem nasvícení pro rozlišení vstupních bitmap 1 px = 50 nm pro různou míru optimalizace.

Na snímcích je patrná změna vizuálního vjemu především v oblastech s vysokou hustotou zápisu. Jde o oblasti, kde se průměrná perioda struktury blíží dvojnásobku rozlišení vstupní bitmapy. Dá se předpokládat, že při návrhu DOE pro účely bezpečnostních hologramů a volbě rozlišení vstupních bitmap budou takovéto případy ojedinělé. Nicméně problém by mohl nastat v případě, že zvolený efekt hologramu bude namodulován na nosné struktuře a změny topologie nosné mikrostruktury budou právě ve velikosti rozlišení vstupních bitmap. Tím že

plocha motivu nesoucí daný efekt je velmi malá a tím i difrakční účinnost vzhledem k ostatním efektům je nízká, může zvolená míra optimalizace vést k celkovému vymizení daného efektu.

3.2.3 Diskuze

Byl prostudován vliv metody pro optimalizaci přípravy expozičních dat pro elektronový litograf Raith EBPG5000+ ES zadávaných obrazovými vstupy na rychlost přípravy expozičních dat, dobu expozice a na optické parametry různých typů DOE. Metoda funguje na principu modifikace hranic objektů mikrostruktur definovaných bitmapami ve vysokém rozlišení. Pro optimalizaci se používá komerčně dostupný software GenISys BEAMER, který zároveň slouží k přípravě expozičních dat pro daný litograf. Ukázalo se, že již velmi malá míra optimalizace má výrazný vliv na zrychlení přípravy expozičních dat u všech testovaných motivů. Změna se více projevuje na motivech s vysokým rozlišením, resp. rozlišením, které se blíží velikosti použitého BSS pro expozici daného motivu. Nicméně u některých nejjednodušších mikrostruktur (periodické mřížky) může tato metoda naopak vést k mírnému navýšení časové náročnosti přípravy expozičních dat.

Obecně ale není bitmapa vhodným formátem pro definici topologie těchto typů mikrostruktur. Metoda využívající daný optimalizační algoritmus, kdy každý objekt je zpracováván nezávisle na okolních objektech, je vhodná pouze pro dvouúrovňové struktury. Po optimalizaci vstupních bitmap se časově nejnáročnější operací stane import vstupních bitmap do softwaru na přípravu expozičních dat. Bylo by tedy zajímavé otestovat jiný vstupní formát, který by definoval příslušné motivy. V takovém případě by bylo ke zvážení, jestli by se struktury definované v jiném formátu zadávaly přímo jako optimalizované (vektorové zadání topologie motivu). Existuje ovšem riziko, že externí (bez použití softwaru na přípravu expozičních dat) příprava takovýchto vstupů by mohla být časově náročnější než při použití stávajícího přístupu. V úvaze by se dalo jít ještě dále, a to definovat expoziční soubor přímo při výpočtu daných motivů. V takovém případě bychom ale eliminovali jakoukoliv možnost editace připravených expozičních dat (kombinace s jiným motivem na úrovni mikrostruktury, výpočet PEC apod.).

Použitá optimalizace má vliv i na rychlost expozice testovaných motivů. Jednoznačné zrychlení expozice nastalo u všech testovaných motivů ve variantě, kdy se rozlišení vstupních bitmap rovná použitému BSS. U variant s nižším rozlišením vstupních bitmap malá míra optimalizace znamená buďto neznatelnou změnu v rychlosti expozice, nebo mírný nárůst expozičního času. V případě vyšší míry optimalizace se čas expozice sníží pouze minimálně. S ohledem na tuto skutečnost je tedy nutné volit kompromis mezi případným zrychlením přípravy dat a tomu odpovídající změnou rychlosti expozice.

Na různých typech DOE se testoval vliv optimalizace expozičních dat na jejich optickou funkci, a to jak pomocí teoretických výpočtů, tak pomocí měření na skutečně vytvořených strukturách. Ukázalo se, že míra změny optické funkce je silně závislá na typu testovaného motivu a rozlišení jeho vstupních bitmap. Ve většině případů vedla optimalizace vstupních bitmap ke snížení homogenity užitečných difrakčních řádů, zvýšení intenzity nultého difrakčního řádu a ke zvýšení intenzity parazitních difrakčních řádů, případně ke vzniku nových parazitních difrakčních řádů. S vysokou mírou optimalizace vstupních bitmap mohou být tyto změny naprosto zásadní pro optickou funkci mikrostruktury. Účinnost parazitních difrakčních řádů dosahovala hodnot užitečných difrakčních řádů, docházelo k přelévání intenzity v rámci užitečných difrakčních řádů apod. Naopak při zkoumání celkového obrazového vjemu vybraných DOE (motiv *frakt*) byla patrná velmi malá změna vůči neoptimalizovaným variantám.

Míra optimalizace vstupních bitmap by tedy měla být volena s ohledem nejen na typ mikrostruktury, ze které se zpracovává DOE skládá, ale i na jeho zamýšlenou aplikaci. U motivů typu bezpečnostního hologramu, kde se výsledný optický vjem neposuzuje měřením účinnosti konkrétních difrakčních řádů, si můžeme dovolit větší míru optimalizace bez nebezpečí výrazné změny optické funkce. Ovšem u DOE, které mají sloužit k velmi přesnému zpracování dopadajícího laserového svazku (různé děliče a tvarovače svazku), se doporučuje míru optimalizace otestovat alespoň pomocí teoretických výpočtů.

Metoda byla publikována v závěrečné zprávě projektu „MPO TRIO FV10618 – Mikro a nano optika pro řízené směřování světla z LED zdrojů“ a nadále se používá v rámci smluvního výzkumu pro přípravu DOE a masterů bezpečnostních hologramů.

3.3 Optimalizace přípravy víceúrovňových struktur do tlustých vrstev rezistu

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). Absencí nosného substrátu na sebe rezistový blok bere roli odvádět náboj a přebytečné teplo vznikající uvnitř rezistu během expozice. Odvedení náboje zajistí tenká kovová vrstva nanesená na povrch bloku rezistu, která ovšem nestačí na odvedení akumulovaného tepla. Proto byla navržena metoda zápisu, která rozloží expoziční dávku nesoucí tepelnou energii do více úrovní, čímž se zároveň zvýší i celková homogenita motivů 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 korekcí proximity efektu. 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 zadaných mikrostruktur.

3.3.1 Nové přístupy k přípravě hlubokých DOE

Problematika tlustých rezistových vrstev

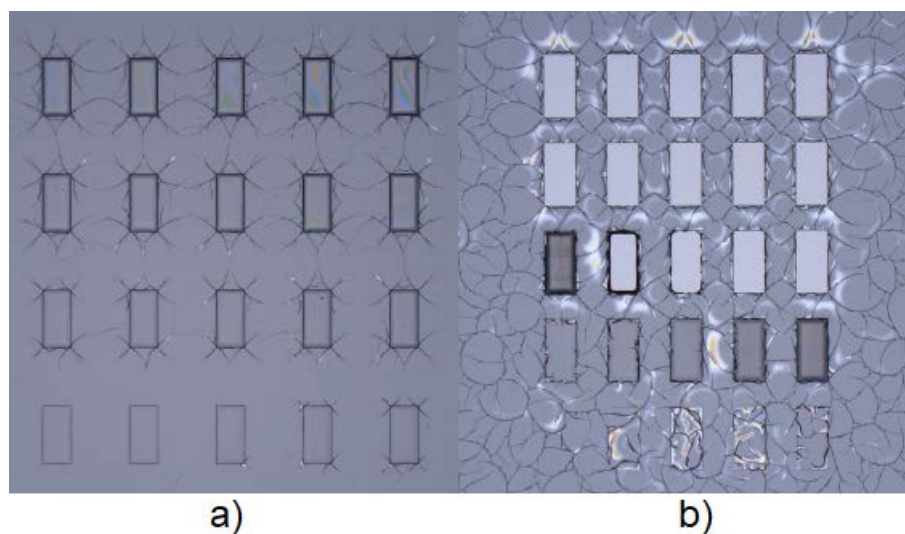
Jak bylo řečeno v kapitole 1.3.3, nanášení tlustých vrstev rezistů pomocí odstředivého lití na nosné substráty s sebou nese řadu obtíží kvůli vysoké viskozitě rezistu. Ta má za následek, že výsledná vrstva rezistu často není homogenní po celé ploše substrátu a snižuje se tak plocha, která se dá využít pro expozici. V případě vrstev s tloušťkou 10 μm a více můžou nehomogenity dosahovat až jednotek mikrometrů. Různá tloušťka rezistu vede k odlišným rozptylovým charakteristikám při interakci elektronů s rezistem v identických výškových hladinách. V tabulce 9 jsou uvedeny parametry α , β a η pro různé tloušťky rezistu PMMA na křemíkovém substrátu v totožných výškových hladinách rezistu (hodnoty získány z GenISys Tracer).

Tab. 9 Hodnoty parametrů α , β a η pro různé tloušťky rezistu PMMA na křemíkovém substrátu v totožných výškových hladinách rezistu vztažených k povrchu rezistu.

Tloušťka Rezistu (μm)	Hloubka od povrchu rezistu (μm)	α (μm)	β (μm)	η (-)
6	6	0,717	30,8	0,844
8	8	1,154	31,2	0,963
	6	0,703	32,4	0,923
10	10	1,662	31,5	1,002
	8	1,093	32,4	1,021
	6	0,685	33,8	0,911
12	12	2,532	31,6	1,079
	10	1,647	33,3	1,057
	8	1,095	35,1	1,032
	6	0,698	36,2	0,913
14	14	3,301	31,3	1,150
	12	2,536	32,6	1,103
	10	1,626	35,2	1,098
	8	1,086	36,4	1,022
	6	0,694	37,8	0,895

Rozdílné hodnoty rozptylových parametrů budou mít za následek odlišné expoziční dávky v různých místech substrátu, což je z hlediska přípravy DOE i jiných typů motivů velmi nepraktické.

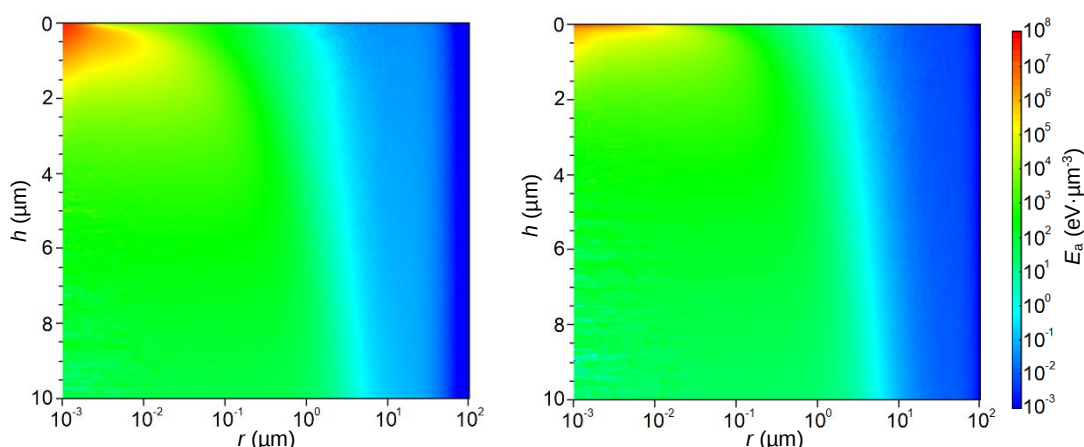
Různá tloušťka rezistu po ploše substrátu bude mít za následek i variaci teplotního profilu během vypékání. To se následně projeví jako odlišná citlivost a kontrast v místech s odlišnou tloušťkou rezistu. Následně během procesu vyvolání může pro delší časy vyvolání (což je pro reliéfní EBL žádoucí) docházet k praskání tlustých vrstev rezistu vlivem vnitřního mechanického pnutí uvnitř rezistu. Na obr. 35 je zobrazen test plošné citlivosti pro časy vyvolání 2 minuty a 6 minut pro rezist PMMA s tloušťkou přibližně 10 μm na křemíkovém substrátu.



Obr. 35 Praskání tlustých vrstev rezistu pro delší časy vyvolání. Test plošné citlivosti pro rezist PMMA, tloušťka $\sim 10\ \mu\text{m}$, Si substrát, vývojka nAAc, čas vyvolání 2 min (a), 6 min (b).

Blok plexiskla jako médium pro expozici pomocí EBL

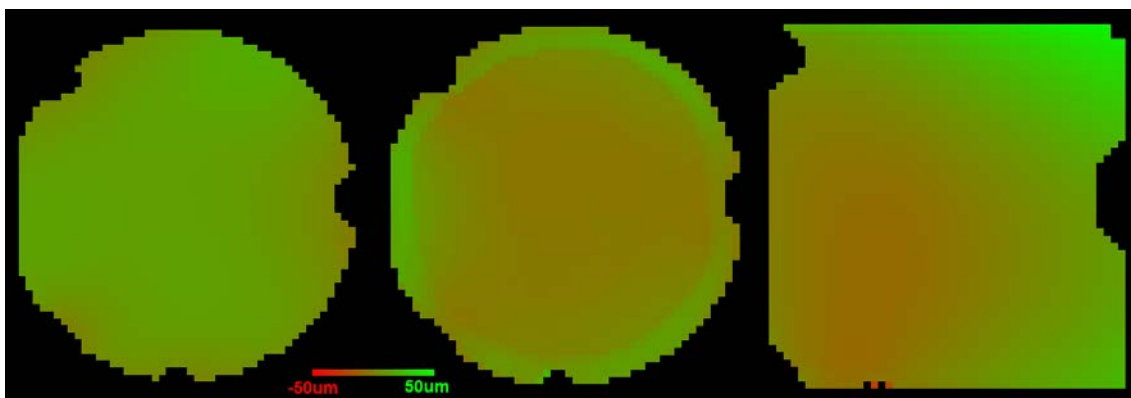
Možnost exponovat přímo do bloku rezistu (v tomto případě do bloku PMMA – plexiskla) eliminuje výše popsané problémy související s nanášením tlustých rezistových vrstev [98]. Při absenci nosného substrátu není tloušťka rezistu omezena zdola a materiál tak má stejné rozptylové charakteristiky i v případě, že povrch bloku rezistu není dokonale rovný. Nicméně rozptyl elektronů v bloku plexiskla bude mít odlišný charakter právě kvůli absenci nosného substrátu. Na obr. 36 je uvedena závislost hustoty absorbované energie v objemu rezistu na vzdálenosti od místa dopadu bodového svazku (Monte-Carlo simulace ze softwaru GenISys TRACER).



Obr. 36 Závislost hustoty absorbované energie v objemu rezistu (PMMA na Si substrátu – vlevo, blok plexiskla – vpravo) na vzdálenosti od místa dopadu bodového svazku pro tloušťku rezistu $10\ \mu\text{m}$ a energie elektronů v primárním svazku $100\ \text{keV}$.

Z těchto simulací je patrné, že v případě bloku plexiskla dochází k mírnému zvýšení dosahu zpětně odražených elektronů (β), nicméně hustota absorbované energie rychleji klesá od místa dopadu primárního svazku elektronů. Dá se tedy předpokládat, že blok plexiskla bude ve srovnání s elektronovým rezistem PMMA méně citlivý (pro dosažení obdobné hloubky bude nutná vyšší expoziční dávka), což je pro reliéfní elektronovou litografii žádoucí.

Z hlediska rovinnosti substrátu se blok plexiskla nemůže vyrovnat leštěnému křemíkovému substrátu nebo skleněné masce. Nicméně po nanesení tlusté vrstvy rezistu na seberovnější substrát se situace mění a celková rovinnost je již srovnatelná s rovinností povrchu bloku plexiskla. Navíc, jak již bylo řečeno výše, v tomto případě křivost povrchu nijak zásadně neovlivňuje expozici, protože tloušťka plexisklového bloku není omezena rozhraním s nosným substrátem. Jediný požadavek na rovinnost bloku plexiskla vychází z možností litografického systému kompenzovat vychylovací pole svazku podle odchylky expoziční roviny (povrch bloku plexiskla) od referenční roviny (pro systém EBP5000+ ES je rozsah $\pm 50\ \mu\text{m}$ od referenční roviny). Na obr. 37 je srovnání rovinnosti bloku plexiskla a $10\ \mu\text{m}$ tlusté rezistové vrstvy na křemíkovém substrátu nanesené pomocí odstředivého lití. Měření probíhalo přímo v litografickém systému EBP5000+ ES pomocí integrovaného laserového interferometru určeného pro mapování topologie substrátu potřebné ke kompenzaci vychylovacího pole svazku.

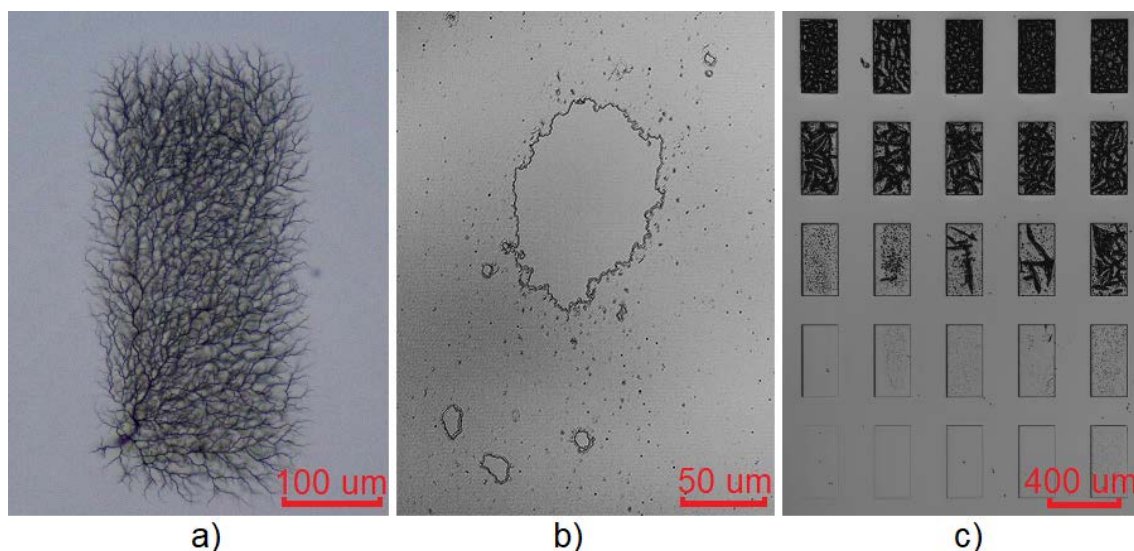


Obr. 37 Srovnání rovinnosti bloku plexiskla (vpravo), čistého křemíkového substrátu (vlevo) a 10 µm tlusté vrstvy rezistu PMMA na křemíkovém substrátu (uprostřed, nanášeno odstředivým litím). Měřeno pomocí interferometru v systému EBP5000+ ES.

Rovinnost bloku plexiskla může být limitujícím faktorem pro přípravu vysoce kvalitních DOE, kde aplikace vyžaduje, aby rovinnost byla co nejvyšší. V takovém případě se ovšem místo reliéfní litografie volí spíše cesta reaktivního iontového leptání do skleněného substrátu, který je možno vyleštit do zlomku vlnové délky dopadající vlny.

Expozice do bloku plexiskla s sebou ovšem přináší nejen výhody, ale i obtíže, se kterými se expozice na křemíkové či jiné polovodičové substráty nebo na skleněné masky s kovovou vrstvou nemusí potýkat. Prvním nedostatkem je nízká elektrická vodivost (resp. vysoká rezistivita). Pro odvedení nahromaděného náboje během expozice je nutné opatřit blok rezistu vodivou vrstvou [98]. Většinou se používá tenká vrstva (několik desítek nanometrů) kovů jako hliník, chróm, zlato nebo stříbro, která se nanáší napařováním, nebo napařováním. Dostupné jsou i vodivé polymery, které jsou z hlediska způsobu nanášení (nanáší se jako rezistové vrstvy např. odstředivým litím) k plexisklu nejšetrnější [99]. Nicméně, jejich použití je limitováno nutností vypékat tyto vrstvy pro dosažení požadovaných vlastností za teplot blízkých 100 °C, což vede k deformaci plexisklového bloku. Pokud by byla vodivá vrstva příliš tenká nebo by nebyla vůbec přítomna, docházelo by vlivem nekontrolovatelných výbojů v rezistu k poškození exponovaného motivu (viz obr. 38a). Parametry procesu nanášení se musí volit s ohledem na nízkou tepelnou vodivost PMMA, kvůli které by se přílišným zahřátím mohl poškodit povrch bloku rezistu (viz obr. 38b), který pak je znehodnocen pro účely expozice. Nízká tepelná vodivost ve srovnání s jinými materiály, které se používají v elektronové litografii jako nosné substráty, omezuje maximální expoziční dávku

použitelnou při expozici [100]. Příliš vysoká expoziční dávka by se projevila lokálním ohřevem povrchu rezistu nad úroveň teploty tání a poté i dosažením teploty varu a docházelo by k poškození bloku rezistu (viz obr. 38c).



Obr. 38 Defekt bloku rezistu způsobený nedostatečným zvodivěním bloku rezistu (a), nevhodným procesem pokovení (b) a expozicí příliš vysokou dávkou (c).

Vlastnosti plexiskla

Bloky plexiskla se vyrábí dvěma způsoby, které mají vliv na výsledné vlastnosti materiálu – extruzí a litím. Lité plexisklo se vyrábí z tekutého monomeru MMA (methylnmethakrylát) a dalších přísad (katalyzátory, barviva apod.), který se vpraví do formy tvořené dvěma pláty skla. Forma se poté zahřeje za přítomnosti vodních par a dojde k polymerizaci a k vytvoření homogenního bloku plexiskla. Extrudované plexisklo se naproti tomu vyrábí již z pelet PMMA, které jsou roztaveny a za vysokého tlaku taženy do bloku požadované tloušťky. Extrudované plexisklo vykazuje mírně anizotropní vlastnosti ve směru tažení oproti ostatním směrům, kdežto lité plexisklo je zcela izotropní. 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 mohou 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 [101][102][103][104]. Na obr. 39a jsou znázorněny defekty na okraji bloku extrudovaného plexiskla po procesu vyvolání, které vznikají působením vývojky na již existující mikropraskliny ve spojení s uvolněním vnitřního mechanického pnutí uvnitř bloku. Tyto praskliny mohou vést k oddělení části bloku plexiskla, případně až k poškození exponovaného motivu. Dalším typem defektu, který se projevuje působením vývojky na extrudované plexisklo, je vznik mikroprasklin po celém povrchu bloku (viz obr. 39b). Nicméně tento typ defektů byl pozorován na vzorcích až po několika měsících od výroby (na nových vzorcích tyto defekty nevznikají). Podle výše uvedených vlastností a zjištěných skutečností je tedy pro potřeby elektronové litografie vhodnější lité plexisklo.

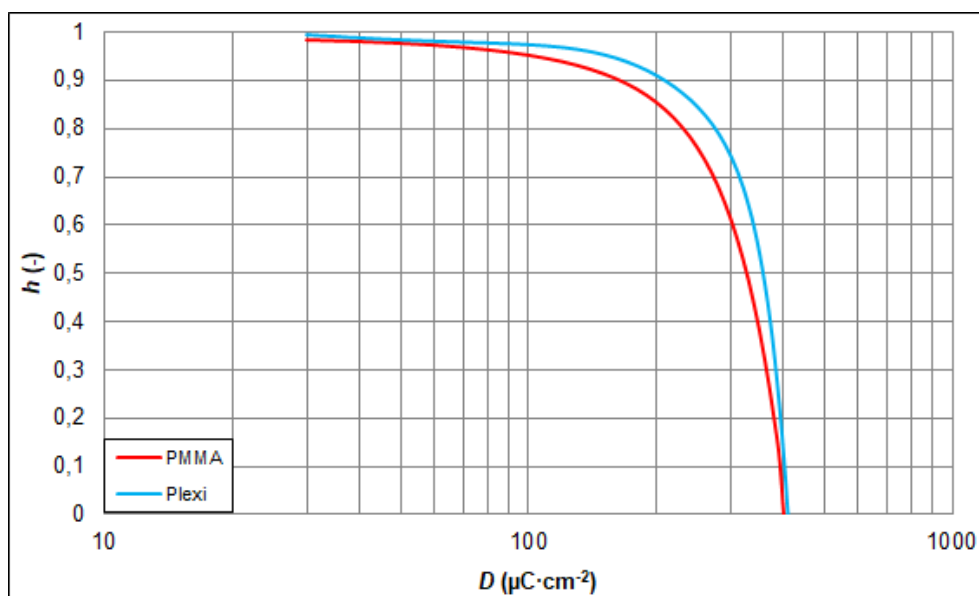


Obr. 39 Defekty na okraji bloku extrudovaného plexiskla vzniklé procesem vyvolání (a). Defekty vyskytující se po celém povrchu extrudovaného plexiskla působením vývojky na vzorky staré několik měsíců (b).

Expozice do bloku plexiskla

Pro další experimenty v této práci se použilo pouze lité plexisklo, které bylo vždy před expozicí pokoveno tenkou vrstvou zlata (~ 30 nm) pomocí napařování. Před procesem vyvolání se vrstva zlata odstranila pomocí leptadla na bázi jodidu draselného a jódu [105]. Jako vývojka pro vyvolání plexiskla byla zvolena nAAc kvůli vyšší citlivosti. Z hlediska reliéfní litografie není citlivější vývojka nejvhodnější kvůli přesnému ladění hloubky struktur. Nicméně z pohledu zahřívání povrchové vrstvy plexiskla během expozice je žádoucí použít co nejnižší expoziční dávky, což právě citlivější vývojka dovoluje (při ekvivalentním procesu vyvolání). Pro srovnání chování bloku plexiskla s tlustou rezistovou vrstvou nanesenou na křemíkovém substrátu byl připraven test plošné citlivosti. Byl použit stejný test plošné

citlivosti jako v kapitole 3.1.1. Expozice se provedla systémem EBP5000+ ES s energií elektronů v primárním svazku 100 keV, jelikož se uvažuje použití plexiskla především pro tvorbu hlubokých reliéfů. Vyvolání probíhalo po dobu 6 minut v lázni při teplotě 21,5 °C. Hloubky se měřily na kontaktním profilometru. Na obr. 40 jsou uvedeny křivky citlivosti normované na hloubku rezistu (10 μm) naneseného na křemíkový substrát.

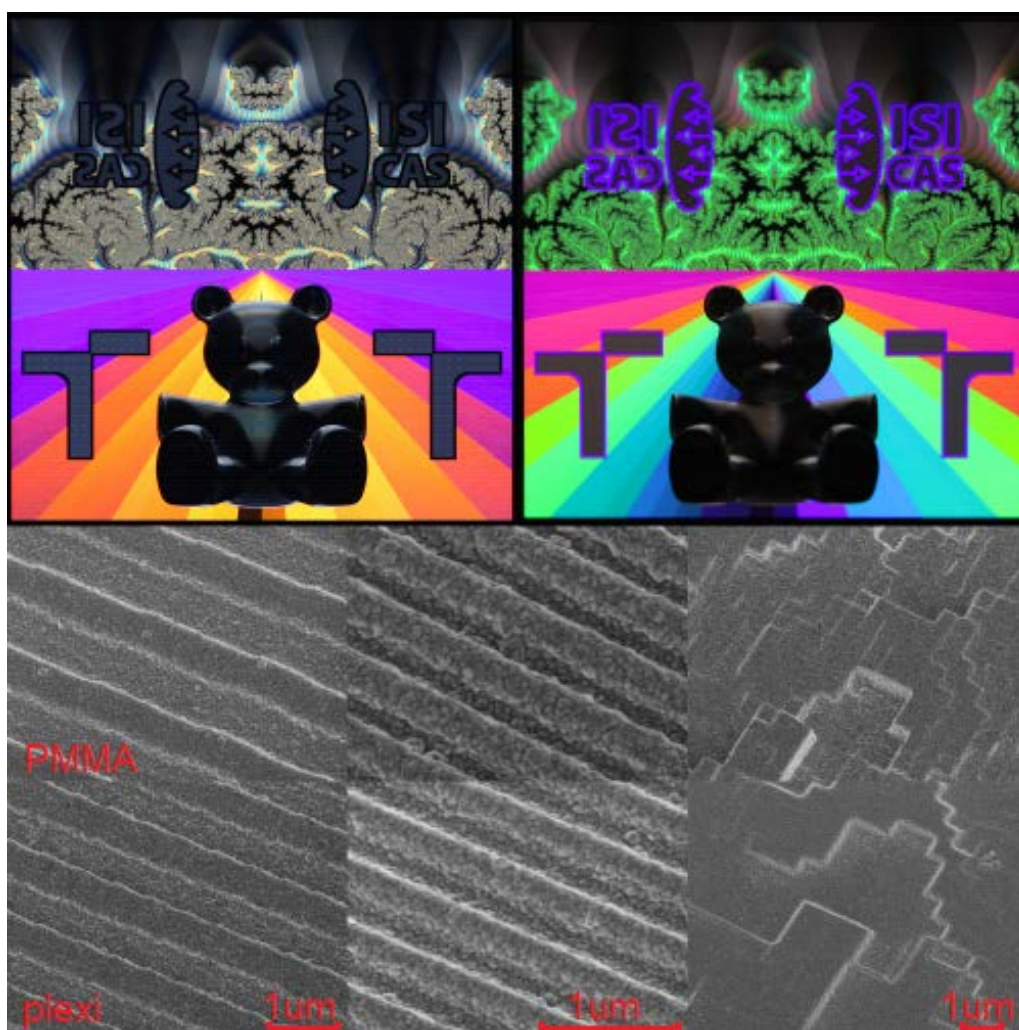


Obr. 40 Křivky citlivosti pro rezist PMMA 350k (tloušťka 10000 nm, substrát Si) a blok litého plexiskla, doba vyvolání 6 min, teplota lázně 21,5 °C, energie elektronů v primárním svazku 100 keV.

Z naměřených křivek citlivosti vyplývá, že lité plexisklo má pro srovnávanou hloubku vyšší kontrast než rezist PMMA ($\gamma_{\text{plexi}} = 9,4$ vs. $\gamma_{\text{PMMA}} = 6,1$). Citlivost je mírně vyšší u rezistu PMMA ($400 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$) než u litého plexiskla ve stejné hloubce ($410 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$). V nižších hloubkách je rozdíl citlivostí vyšší. V případě bloku plexiskla ovšem parametr citlivosti jako hodnota dávky, kdy je rezist vyvolán do dna, pozbývá smyslu, protože blok plexiskla není omezen nosným substrátem. Důležité je zmínit, že při způsobu expozice, jakým byla připravena plošná citlivost (nejednou se exponuje celá dávka v jedné vrstvě), začíná docházet pro dávky v rozsahu $300\text{--}330 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ k praskání vodivé vrstvy. Nicméně po odstranění vodivé vrstvy není tento defekt na povrchu plexiskla pozorován. Situace může být jiná v případě motivu jemnějšího než je motiv pro test plošné citlivosti. Jestliže se dávky ještě zvýší, začne v rozmezí $450\text{--}480 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ docházet dokonce k deformaci bloku plexiskla vlivem naakumulovaného tepla a tyto dávky již nejsou použitelné. Opět v případě reálného

motiv, který se skládá z jemnějších struktur a neexponuje se kontinuálně vyšší dávkou, může být situace jiná.

Pro potvrzení, že lze na povrch bloku plexiskla vytvářet motivy, které se dají připravit do rezistu PMMA na křemíkových substrátech, se provedla testovací expozice s motivem uvedeným na obr. 19. Expoziční dávky byly přizpůsobeny dle křivky citlivosti na obr. 40. Exponovaný motiv byl po vyvolání pokoven vrstvou stříbra pro zvýšení odrazivosti. Na obr. 41 jsou uvedeny snímky celého motivu pod různým úhlem nasvícení a detaily některých mikrostruktur ve srovnání s původní expozicí do rezistu PMMA na křemíkovém substrátu.



Obr. 41 Snímky testovacího motivu pod různým úhlem nasvícení, expozice do bloku litého plexiskla systémem EBPG5000+ ES. Snímky ze SEM srovnávající stejný typ mikrostruktury (dvouúrovňová mřížka s periodou 1,2 μm – vlevo, dvouúrovňová mřížka s periodou 400 nm – uprostřed, 8úrovňové CGH – vpravo) exponovaný do litého plexiskla a do rezistu PMMA na křemíkovém substrátu.

Snímky ukazují, že běžné typy mikrostruktur, které se používají při tvorbě CGH, jsou v případě přípravy do bloku litého plexiskla nerozlišitelné od těch připravených do rezistu PMMA na křemíkovém substrátu.

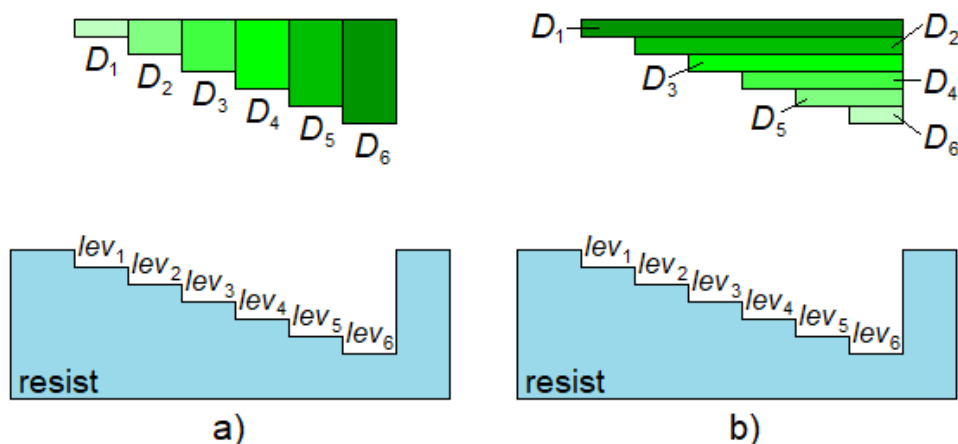
3.3.2 Metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.1.2, výsledná kvalita vytvářených DOE je mimo jiné ovlivněna nehomogenitou osvitů expozičních polí. Dále bylo řečeno, že tato nehomogenita je tím výraznější, čím hlubší struktury se připravují (se zvyšující se hloubkou struktury se zvyšuje kontrast soustavy rezist / vývojka / způsob vyvolání). Bylo i naznačeno několik možností, jak nehomogenity potlačit. V případě expozice do bloku plexiskla, které se přímo nabízí pro tvorbu hlubokých DOE (hloubka několik mikrometrů), je tedy nutné tento problém řešit.

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. 42), tzv. frézovaný zápis (označení způsobu zápisu), kdy expoziční dávka dané vrstvy je dána následujícím vztahem:

$$D_{\text{lev}, \text{frez}, n} = D_{\text{lev}, n} - D_{\text{lev}, (n-1)}, \quad (21)$$

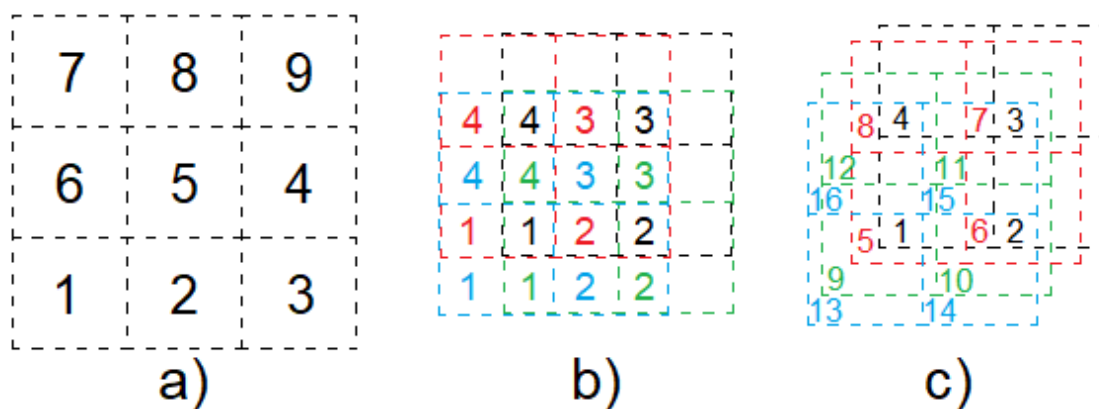
kde $D_{\text{lev}, n}$ je expoziční dávka n -té úrovně při standardním zápisu a $D_{\text{lev}, (n-1)}$ je expoziční dávka předcházející výškové úrovně.



Obr. 42 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. 42) v sobě nesou topologii více vrstev, se sice exponuje větší plocha, nicméně s nižší mírou členitosti. Tudíž je při přípravě expozičních dat možné využít nižší počet větších trapezoidů (systémy s Gaussovským svazkem), nebo nižší počet větších razítek (systém s tvarovaným svazkem). 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. Pro frézovaný způsob zápisu je navíc možné využít optimalizaci hranic jednolitých objektů prezentovanou v kapitole 3.2, jelikož dojde k rozčlenění motivu do série dvouúrovňových motivů.

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. 43 je znázorněna topologie expozičních polí ve srovnání se standardním zápisem a běžně využívaným zápisem s vícenásobnými přeběhy [59].



Obr. 43 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:

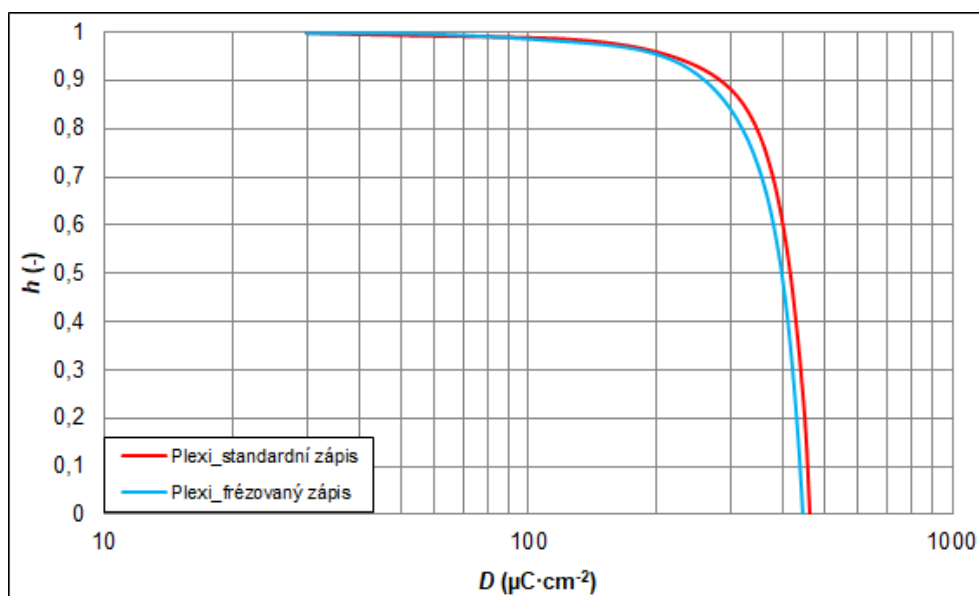
$$X_n = (n-1) \cdot \frac{S_X}{n} + d(0; \frac{S_X}{n}), \quad (22)$$

$$Y_n = (n-1) \cdot \frac{s_Y}{n} + d(0; \frac{s_Y}{n}), \quad (23)$$

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 osvitu v rámci expozičních polí se rozloží v každé vrstvě jiným způsobem, což přispěje k celkové homogenizaci motivu. K dalšímu zvýšení homogenity motivu může vést i nestejná maximální velikost subpolí v každé vrstvě (u systémů s Gaussovským svazkem), případně nestejná maximální velikost razítka u systémů s tvarovaným svazkem. 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 EBP5000+ ES). S počtem výškových úrovní (exponovaných vrstev) ovšem lineárně narůstá čas potřebný na pojezdy stolů mezi jednotlivými expozičními poli. Zrychlení či zpomalení expoziční doby ve srovnání se standardním přístupem, kdy se v rámci jednoho expozičního pole exponují všechny výškové úrovně, bude závislé i na rozdílu mezi maximální a minimální expoziční dávkou v daném motivu. Přesnost soukrytu jednotlivých vrstev motivu bude dána přesností a stabilitou expozičního systému, nicméně se dá očekávat, že bude nižší než v případě standardního způsobu zápisu. 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 současně se zvyšuje i doba pro odvedení nahromaděného náboje. Což je velmi výhodné pro expozici na vysoce nevodivých substrátech nebo přímo do bloku plexiskla.

Jestliže se předpokládá zápis výše popsanou metodou do bloku plexiskla, je nutné pro stanovení expozičních dávek připravit test plošné citlivosti odpovídající danému způsobu zápisu (rozložení lokální expoziční dávky do několika dílčích dávek). Z hlediska rozměrů a rozsahu expozičních dávek byl opět použit test plošné citlivosti jako v kapitole 3.1.1, nicméně se exponoval podle výše popsané metody. Expozice proběhla na systému

EBPG5000+ ES, pro vyvolání se použila vývojka nAAc, vyvolání probíhalo při teplotě 21,5 °C. Na obr. 44 je uvedeno srovnání křivek citlivosti pro standardní způsob zápisu a zápis metodou překrývajících se vrstev s kvazi-nepravidelně umístěnými expozičními poli při expozici do bloku litého plexiskla. Křivky citlivosti jsou normované na hloubku v plexiskle 20 μm .



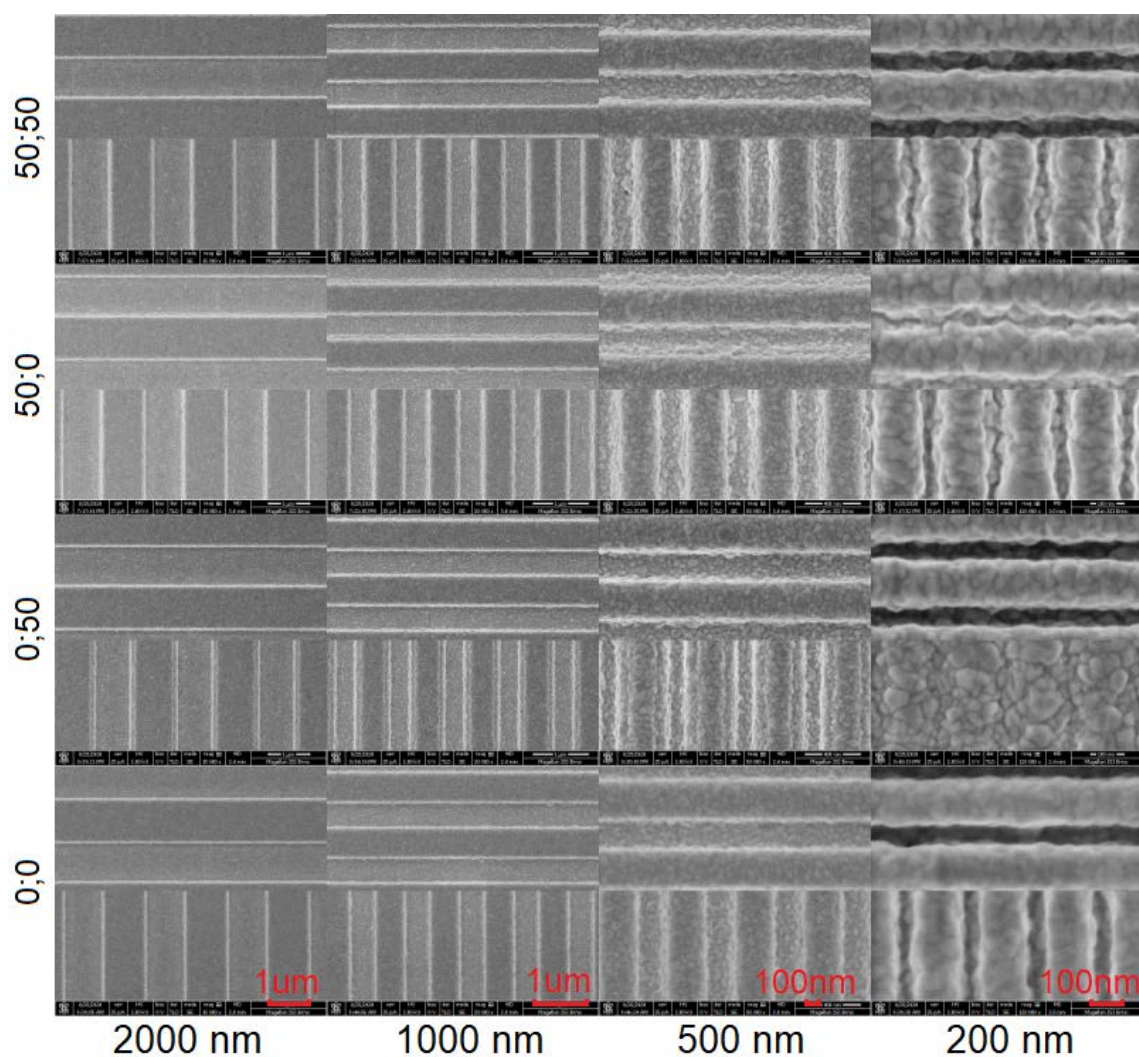
Obr. 44 Křivky citlivosti pro blok litého plexiskla pro standardní a frézovaný způsob zápisu, doba vyvolání 6 min, teplota lázně 21,5 °C, energie elektronů v primárním svazku 100 keV.

Z naměřených křivek vyplývá, že frézovaný způsob zápisu vede k mírnému zvýšení citlivosti rezistu a ke snížení kontrastu. Toto zjištění je v rozporu s tvrzením, že se vzrůstající teplotou rezistu roste jeho citlivost [106][107]. A právě způsob zápisu vícenásobných přeběhů se používá ke snižování teplotní zátěže rezistu [108]. Nicméně při tomto způsobu zápisu jednotlivé přeběhy, při kterých se několikrát exponuje stejné místo identickou expoziční dávkou, následují pro dané expoziční pole těsně za sebou (v závislosti na topologii motivu a expoziční dávce jde o stovky milisekund až jednotky sekund). V případě frézovaného zápisu použitého ve vyvinuté metodě může být ovšem prodleva mezi expozicemi jednotlivých vrstev mnohem větší (v závislosti na topologii a velikosti motivu). Vyšší citlivost může být tedy ovlivněna jiným mechanismem než lokálním ohřevem rezistu. I když tato souvislost se zvýšením citlivosti nebyla přímo popsána, jelikož tímto způsobem se běžně expozice neprovádí, mohla by souviset s nábojem vznikajícím v objemu rezistu. Hromadění náboje

a jeho nedostatečný odvod obvykle zapříčiní odklon svazku elektronů od místa dopadu a může změnit rozměry exponovaných struktur [109][110][111]. Dostatečný čas pro odvod náboje a zvýšení hustoty absorbované energie by mohly převážet nad lokálním ohřevem rezistu, čímž se zvýší citlivost. Dále se u tohoto způsobu zápisu v rozsahu použitých expozičních dávek (maximální dávka byla $600 \mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$) neprojevovalo praskání vodivé vrstvy na povrchu bloku plexiskla ani deformace bloku plexiskla.

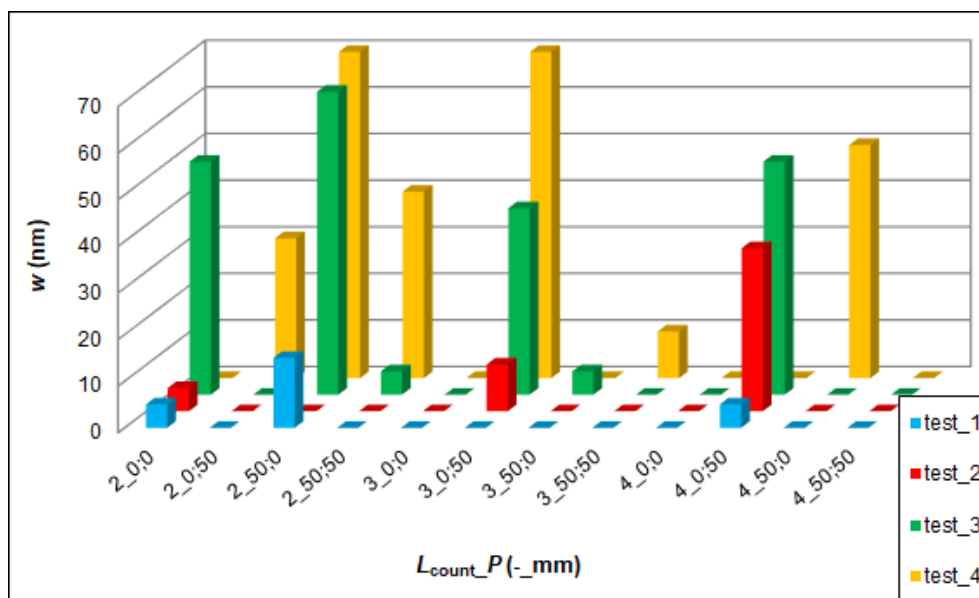
Aplikace metody frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí

Jak již bylo řečeno výše, předpokládaná přesnost vyvinuté metody je 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, kdy se vše exponuje v jedné vrstvě (jedna expoziční dávka na dané místo najednou) 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. Expozice se provedla do bloku litého plexiskla o rozměru $65\times 65 \text{ mm}^2$, vyvolání proběhlo v lázni o teplotě $21,5^\circ\text{C}$ vývojkou nAAc po dobu 6 minut. Vyvolaný motiv se pokovil tenkou vrstvou stříbra kvůli vyhodnocení na elektronovém mikroskopu. Na obr. 45 je uvedena přesnost sesazení jednotlivých vrstev pro variantu se čtyřmi přeběhy pro jednotlivé mřížky ve všech čtyřech rozích motivu. V příloze L jsou uvedeny snímky pro ostatní varianty expozice.



Obr. 45 Přesnost sesazení jednotlivých vrstev (čtyři vrstvy) pro metodu frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelně umístěnými expozičními poli pro mřížky s různou periodou (horizontální popis snímků), orientací a pozicí na substrátu (vertikální popis snímků). Snímek ze SEM.

Celý test byl proveden čtyřikrát. Na obr. 46 jsou uvedena měření přesnosti soukrytu jednotlivých vrstev pro všechny testy jako změna velikosti exponované části nejmenší rozlišitelné periody vůči standardně exponované variantě pro horizontální směr linek mřížky. V příloze L jsou uvedeny výsledky pro vertikální směr linek mřížek.



Obr. 46 Přesnost soukrytu jednotlivých vrstev jako závislost změny exponované části mřížky s nejmenší rozlišitelnou periodou vůči standardnímu způsobu expozice na počtu exponovaných vrstev (L_{count}) a pozici motivu na substrátu (P), horizontální směr linek mřížky.

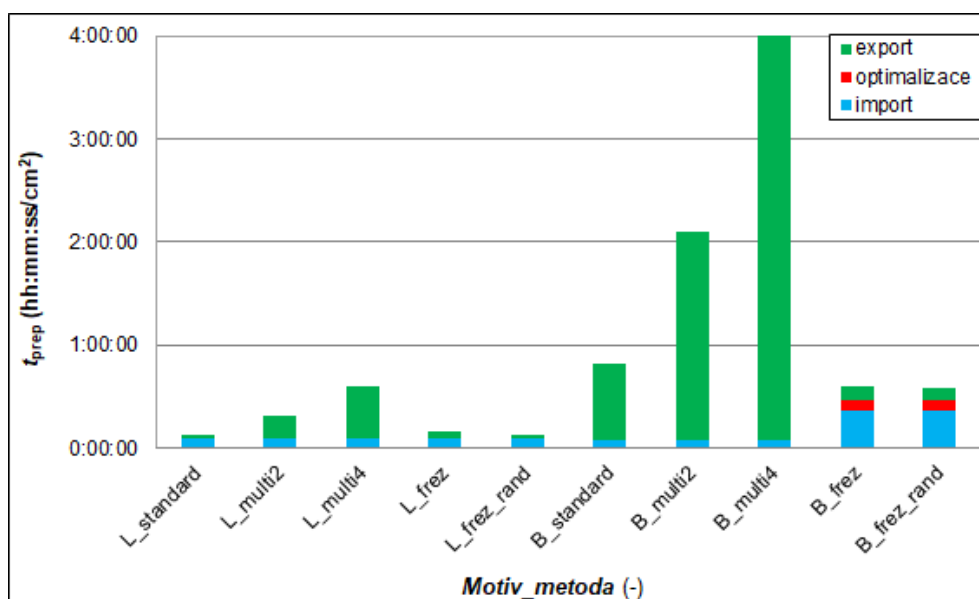
Výsledky testů potvrzují to, co bylo naznačeno výše, že přesnost sesazení jednotlivých vrstev je dána především přesností expozičního systému a jeho stabilitou. Jednotlivé výsledky testů provedených na expozičním systému EBP5000+ ES neukazují, že by nepřesnost souvisela se vzrůstajícím počtem exponovaných 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 EBP5000+ ES dochází podle provedených testů k nepřesnosti sesazení některé z vrstev nejvýše ~ 100 nm. Dá se předpokládat, že přesnost bude dále klesat s časovou náročností expozice. Přesnost by se tedy dala zvýšit rozdělením motivu do více částí.

Pro otestování metody z hlediska časové náročnosti přípravy expozičních dat, doby expozice a především zvýšení homogenity exponovaného motivu byly připraveny dva testovací motivy. Jedním z nich byla achromatická 8úrovňová struktura použitá již v této kapitole jako jeden z typů motivů exponovaných v rámci testu použitelnosti plexisklového bloku pro přípravu různých typů DOE pomocí EBL. Motiv byl definován pomocí obrazových vstupů s rozlišením $1 \text{ px} = 200 \text{ nm}$. Druhým motivem byla 16úrovňová Fresnelova čočka definovaná pomocí vektorových vstupů s rozlišením hraničních bodů jednotlivých úrovní 1 nm . Oba dva

motivy byly připraveny pro expozici do bloku litého plexiskla na systému EBP5000+ ES s navrženou hloubkou 3000 nm. Expoziční data byla připravena pomocí softwaru GenISys BEAMER. Pro vygenerování expozičních dat byly použity identické parametry. Velikost $BSS = 50 \text{ nm}$, velikost expozičního pole $200 \times 200 \mu\text{m}^2$, stejná strategie zápisu v rámci expozičního pole. Expoziční data byla připravena pro expozici pomocí následujících metod:

- 1) Standardní způsob zápisu dle obr. 42a.
- 2) Metoda vícenásobných přeběhů se dvěma přeběhy pro všechny výškové úrovně.
- 3) Metoda vícenásobných přeběhů se čtyřmi přeběhy pro všechny výškové úrovně.
- 4) Metoda frézovaného zápisu, kdy se v jednom expozičním poli exponují všechny vrstvy.
- 5) Metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí.

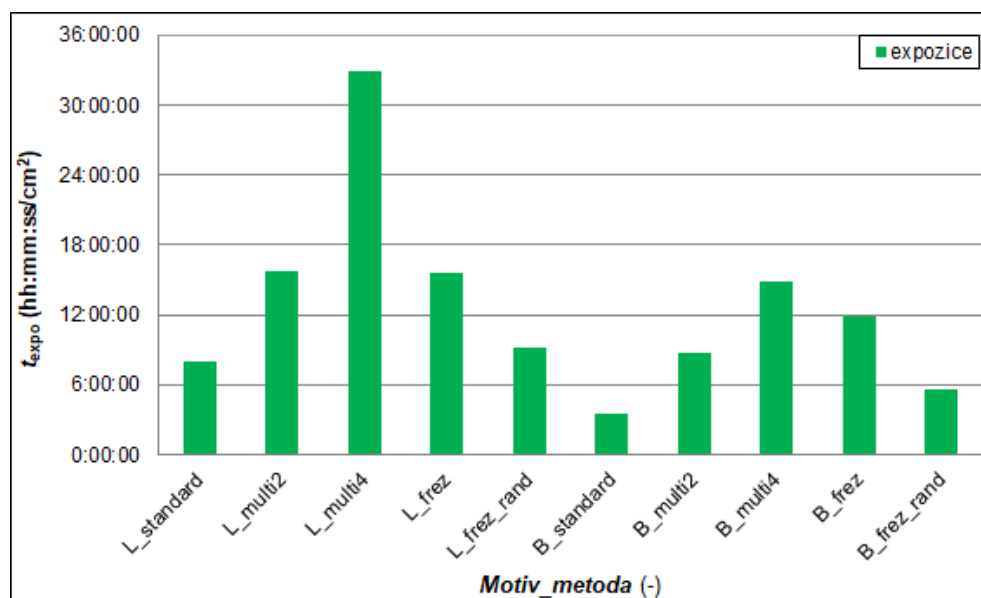
Na obr. 47 je uvedeno srovnání časové náročnosti přípravy expozičních dat pro jednotlivé metody zápisu.



Obr. 47 Srovnání časové náročnosti přípravy expozičních dat pro různé metody zápisu exponovaného motivu. Doba přípravy je normována na 1 cm^2 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 3.2.1., 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. Expoziční dávky pro danou metodu zápisu byly stanoveny podle křivek citlivosti uvedených na obr. 44. 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. 48 je uvedeno srovnání expoziční doby pro testované metody zápisu.

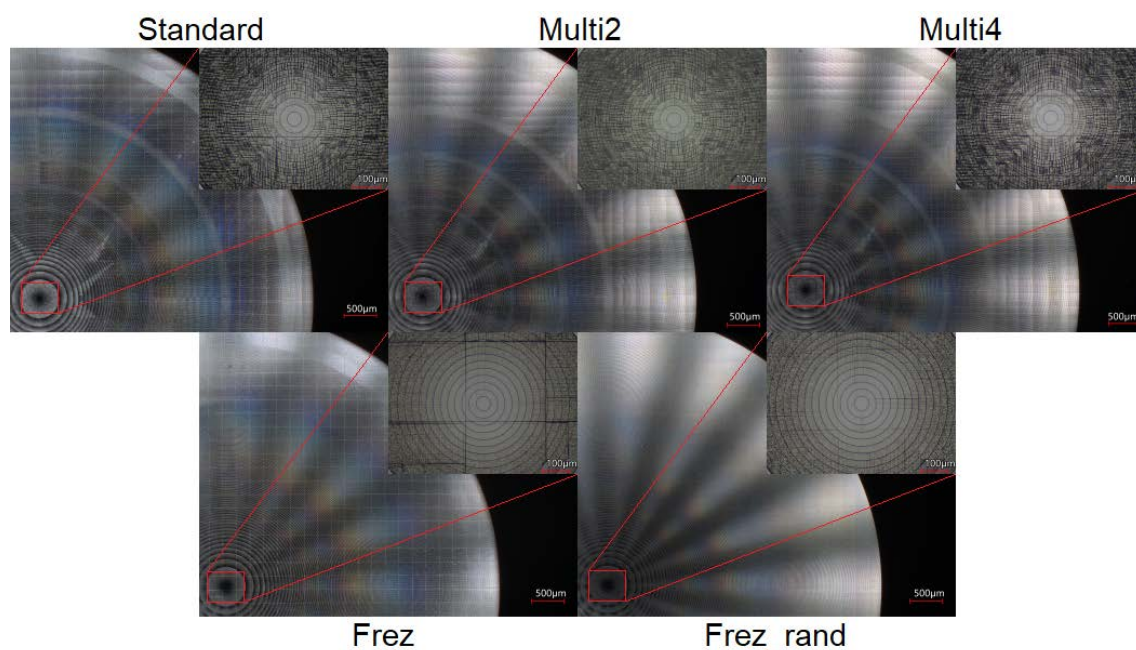


Obr. 48 Srovnání expoziční doby motivů *L* (Fresnelova čočka) a *B* (achromatická struktura) pro různé metody zápisu motivů.

Rychlost expozice na systému EBP5000+ 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 21). 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 obdobná 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. 49 jsou uvedeny snímky motivu Fresnelova čočka z optického mikroskopu pro různé způsoby zápisu ilustrující vliv na homogenitu exponovaného motivu. Snímky z achromatického motivu jsou uvedeny v příloze M.



Obr. 49 Srovnání homogenity motivu Fresnelova čočka pro různé způsoby zápisu. Snímky z optického mikroskopu.

Ze snímků je patrné, že standardní způsob zápisu (všechna místa exponovaná v jedné vrstvě v jednom expozičním poli) není vhodný pro přípravu víceúrovňových struktur, protože dochází ke zvýraznění hranic mezi jednotlivými expozičními poli a trapezoidy, což přispívá

k nehomogenitě exponovaného motivu. To poté vede ke vzniku nežádoucích difrakčních řádů realizovaných DOE. K určitému potlačení těchto nehomogenit (především rozlišitelnosti expozičních polí) vede použití metody vícenásobných přeběhů. Více přeběhů znamená vyšší homogenitu. K potlačení nehomogenit vznikajících na styku jednotlivých trapezoidů pomůže frézovaný způsob expozice, nicméně stále přetrvává velmi výrazná nehomogenita od expozičních polí. Vyvinutá metoda v sobě kombinuje oba zmíněné přístupy a z uvedených příkladů je výsledná expozice nejhomogennější. 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.

3.3.3 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 zdlouhavých 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 (dle tab. 1 je tato hodnota pro rezist PMMA s tloušťkou 2000 nm na křemíku přibližně 30 μm).
- 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 (dle tab. 1 je tato hodnota pro rezist PMMA s tloušťkou 2000 nm na křemíku u dna rezistu přibližně 130 nm).
- Plocha jednotlivých výškových úrovní je stejná.
- 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 obdobná jako uvnitř motivu. V příloze N jsou uvedeny expoziční dávky pro různé typy mikrostruktur splňující výše uvedené předpoklady a dokazující tak, že trendy expozičních dávek (a tudíž i hustota absorbované energie) jsou pro danou hloubku obdobné.

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 [58]. Příspěvky dávek okolních expozic modifikují potřebnou expoziční dávku pro dosažení požadované hloubky dané výškové úrovně podle hloubky struktury odpovídající expoziční dávce z křivky citlivosti. Celý postup metody výpočtu expozičních dávek se dá rozdělit do následujících kroků:

- 1) Volba rozsahu hloubek struktur $\langle h_{\min}; h_{\max} \rangle$, pro který má být metoda platná.

- 2) Výpočet rozptylové funkce pro danou soustavu substrát/rezist, stanovení rozptylových parametrů β , α a η ve zvolené hloubce.
- 3) Příprava plošné křivky citlivosti pro zamýšlený model (příprava expozičních dat, expozice, vyvolání a sestrojení křivky citlivosti z naměřených dat).
- 4) Výpočet expozičních dávek pro jednotlivé výškové úrovně (libovolný počet) na modelové struktuře pro několik zvolených hloubek v rámci uvažovaného rozsahu (včetně maximální a minimální hloubky) pomocí referenčního modelu pro výpočet PEC.
- 5) Sestrojení závislostí expozičních dávek na hloubce jednotlivých výškových úrovní pro všechny zvolené hloubky mikrostruktury z předchozího bodu.
- 6) Aproximace závislostí z předchozího bodu pomocí vhodných funkcí
- 7) $D_{lev} = f(h_{lev})$ pro všechny zvolené hloubky mikrostruktury. Aproximace pro maximální hloubku tvoří základní funkci pro výpočet expoziční dávky dané výškové úrovně.
- 8) Výpočet expozičních dávek jednotlivých výškových úrovní pro hloubku mikrostruktury odpovídající dané aproximaci z předchozího bodu pro všechny hloubky mikrostruktury kromě maximální uvažované hloubky mikrostruktury.
- 9) Výpočet expoziční dávky pro výškové úrovně podle aproximační funkce pro maximální uvažovanou hloubku mikrostruktury pro další zvolené hloubky mikrostruktury kromě maximální uvažované hloubky mikrostruktury.
- 10) Výpočet rozdílu expozičních dávek jednotlivých výškových úrovní získaných aproximací pro danou hloubku mikrostruktury z bodu 7) a stejných výškových úrovní získaných pomocí aproximace pro maximální uvažovanou hloubku mikrostruktury z bodu 8).
- 11) Sestrojení závislosti průměrného rozdílu expozičních dávek z předchozího bodu na hloubce mikrostruktury.
- 12) Aproximace závislosti z předchozího bodu pomocí vhodné funkce $D_c = f(h_{stru})$.

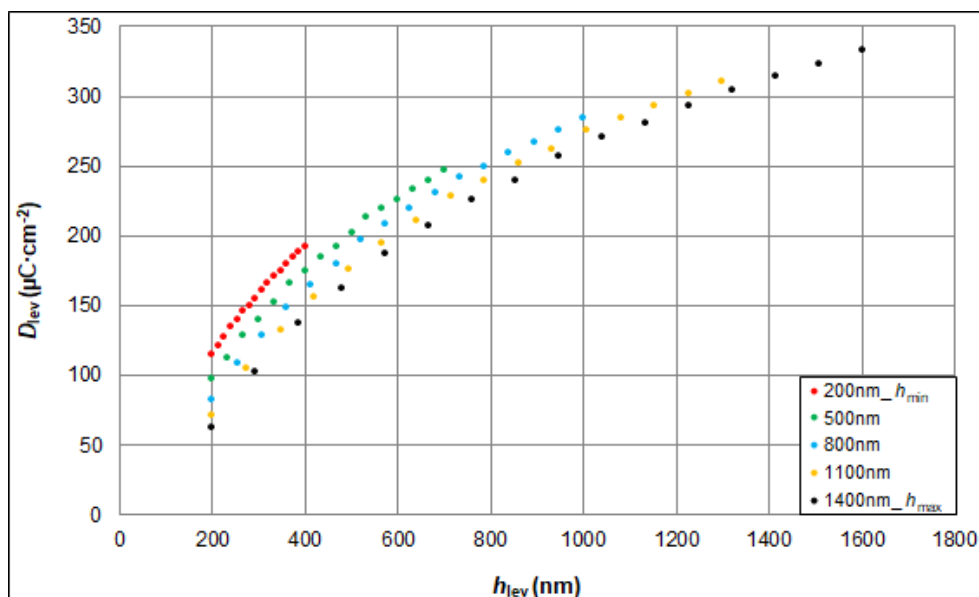
- 13) Získání funkce ve tvaru $D_{\text{lev}} = f(h_{\text{lev}}, h_{\text{stru}})$ pro výpočet expoziční dávky jednotlivých výškových úrovní pro mikrostruktury s hloubkou v rozsahu $\langle h_{\text{min}}; h_{\text{max}} \rangle$ a splňující předpoklady uvedené výše.

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 být metoda uplatněna, bude 200–1400 nm.

Pro tuto soustavu byly pomocí softwaru GenISys TRACER 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 byla uvedena na obr. 14 (vývojka nAAc).

Na obr. 50 je uvedena závislost expoziční dávky na hloubce výškové úrovně (vztažené k povrchu rezistu) pro jednotlivé výškové úrovně 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 mírně zapuštěná v rezistové vrstvě [60].

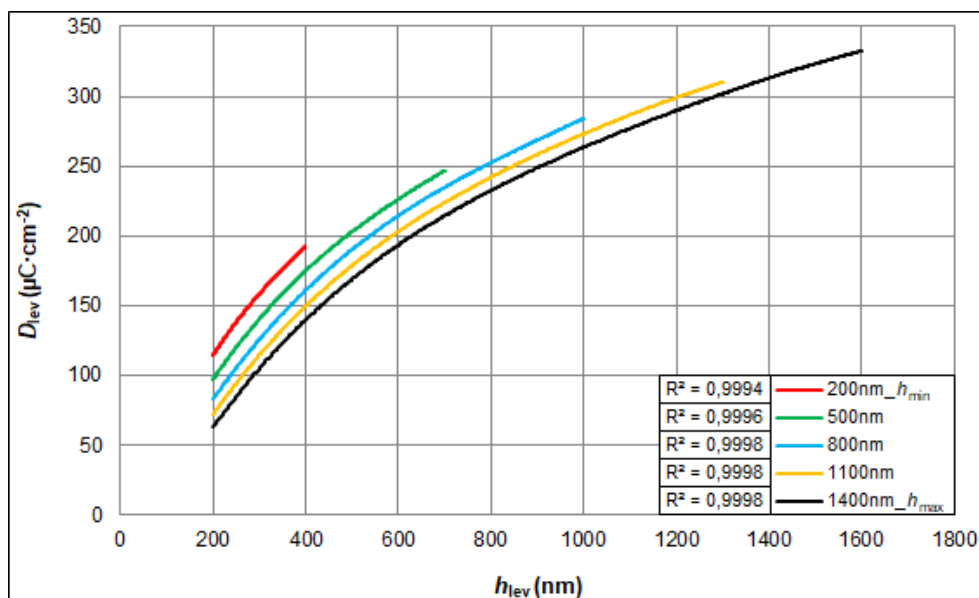


Obr. 50 Závislost expoziční dávky výškové úrovně na hloubce výškové úrovně pro různé hloubky mikrostruktury. Lineární mřížka, perioda 15 μm , 16 výškových úrovní.

Jednotlivé závislosti z obr. 50 byly aproximovány pomocí polynomu k -tého stupně:

$$D_{lev} = \sum_{i=0}^k p_i \cdot h_{lev}^i, \quad (23)$$

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. Na obr. 51 jsou uvedeny aproximace závislostí z obr. 50 s hodnotami spolehlivosti aproximace.



Obr. 51 Aproximace závislostí expoziční dávky výškové úrovně na hloubce výškové úrovně pro různé hloubky mikrostruktury s hodnotami spolehlivosti aproximace. Lineární mřížka, perioda 15 μm .

Pomocí stanovených aproximací se vypočítají expoziční dávky jednotlivých výškových úrovní odpovídající dané hloubce pro danou aproximační funkci. V tabulce 10 jsou uvedeny hodnoty odpovídající aproximační funkci pro hloubku mikrostruktury 200 nm (minimální uvažované hloubky mikrostruktury).

Pro stejnou hloubku mikrostruktury se vypočítají expoziční dávky pomocí aproximační funkce stanovené pro hloubku mikrostruktury 1400 nm (maximální uvažovaná hloubka mikrostruktury). Tyto hodnoty jsou také uvedené v tabulce 10. V příloze O jsou uvedeny hodnoty pro ostatní aproximační funkce odpovídající dalším modelovým hloubkám.

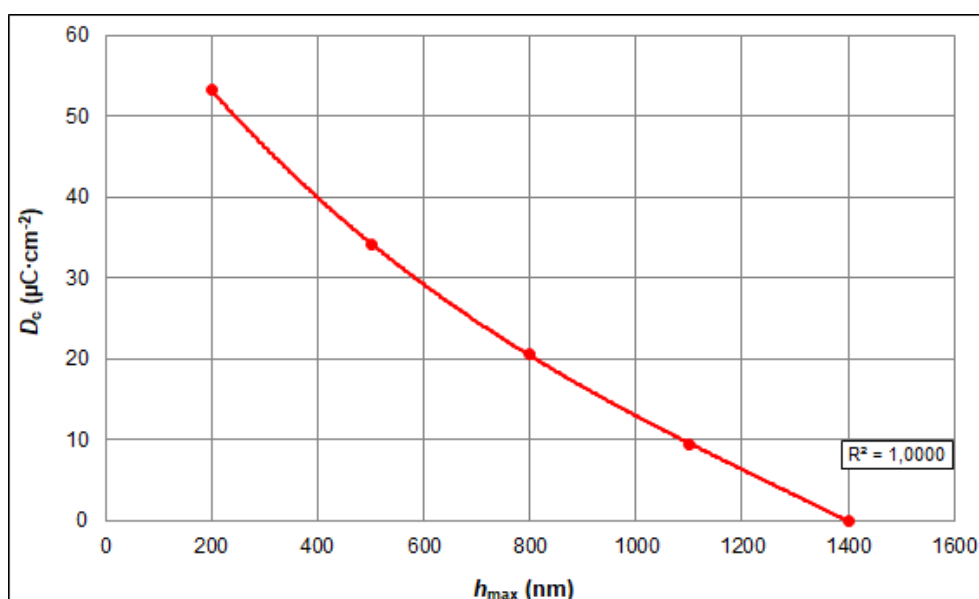
Z takto získaných hodnot se vypočítá průměrný rozdíl expozičních dávek odpovídající dané hloubce mikrostruktury vůči expozičním dávkám vypočítaných podle aproximační funkce pro

maximální uvažovanou hloubku mikrostruktury (1400 nm). Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10. V příloze O jsou uvedeny rozdíly expozičních dávek pro ostatní modelové hloubky mikrostruktury.

Tab. 10 Expoziční dávky pro strukturu lineární mřížky s periodou 15 μm a hloubkou struktury 200 nm, 16 výškových úrovní, získané z aproximačních funkcí pro hloubky mikrostruktury 200 nm a 1400 nm.

Výšková úroveň	Hloubka úrovně (nm)	200 nm		1400 nm
		D_{lev}	$D_{\text{lev-dev}}$	D_{lev}
		$(\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$		$(\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$
1	200	114,6	51,7	62,9
2	213	121,3	52,3	68,9
3	227	127,7	52,8	74,9
4	240	133,8	53,2	80,6
5	253	139,6	53,4	86,3
6	267	145,3	53,5	91,7
7	280	150,7	53,6	97,1
8	293	155,9	53,6	102,3
9	307	160,9	53,5	107,4
10	320	165,8	53,5	112,4
11	333	170,6	53,4	117,2
12	347	175,2	53,3	122,0
13	360	179,8	53,2	126,6
14	373	184,3	53,2	131,1
15	387	188,7	53,2	135,5
16	400	193,2	53,3	139,8
$D_{\text{lev-dev-avg}} (\mu\text{C}\cdot\text{cm}^{-2})$			53,2	

Z průměrných hodnot rozdílů expozičních dávek pro modelové hloubky mikrostruktury byla sestavena korekční křivka, tedy závislost korekce expoziční dávky pro všechny výškové úrovně profilu mikrostruktury na celkové hloubce mikrostruktury. Závislost je uvedena na obr. 52.



Obr. 52 Závislost korekce expoziční dávky pro výškové úrovně na celkové hloubce mikrostruktury pro aproximační model PEC.

Uvedená závislost byla aproximována (viz obr. 52 včetně hodnoty spolehlivosti aproximace) jako polynom m -tého stupně:

$$D_c = \sum_{i=0}^m q_i \cdot h_{\text{stru}}^i, \quad (24)$$

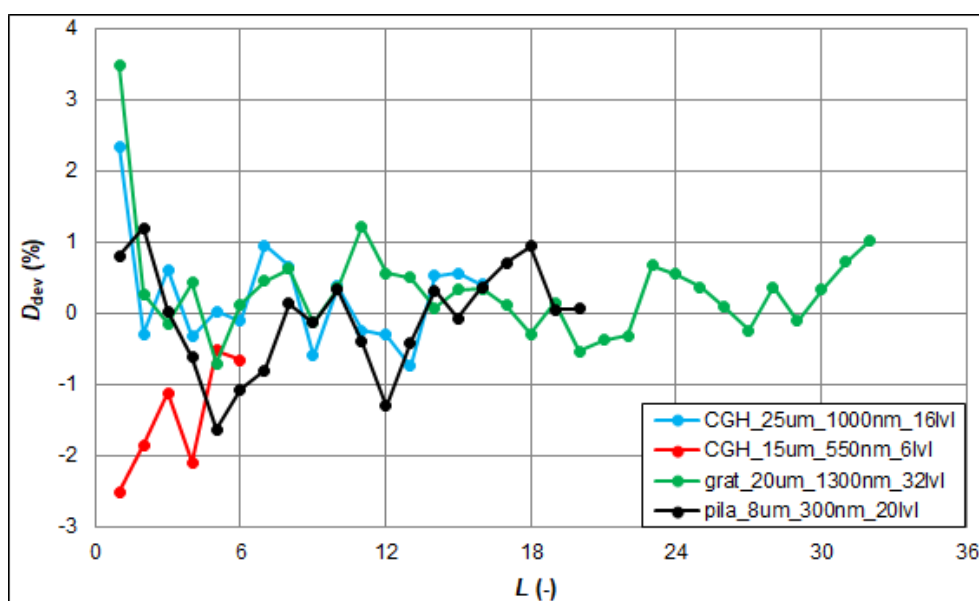
kde D_c je korekce expoziční dávky pro všechny výškové úrovně mikrostruktury, h_{stru} je celková hloubka mikrostruktury, q_i jsou koeficienty polynomu, m je stupeň polynomu. Obecný vztah pro výpočet expoziční dávky pro danou výškovou úroveň aproximační metody je součtem aproximační funkce pro maximální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

$$D_{\text{lev}} = \sum_{i=0}^4 p_i \cdot h_{\text{lev}}^i + \sum_{i=0}^3 q_i \cdot h_{\text{stru}}^i. \quad (25)$$

Hodnoty koeficientů polynomů jsou následující:

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

Na obr. 53 je uvedena odchylka expozičních dávek vypočtených aproximační metodou pomocí vztahu 25 vůči expozičním dávkám stanoveným pomocí referenčního modelu pro výpočet PEC pro různé tvary profilů mikrostruktur s různou hloubkou a s různým počtem výškových úrovní. V příloze P jsou uvedeny příklady odchylek expozičních dávek pro jinou soustavu rezist/substrát vytvořených podle křivky citlivosti uvedené na obr. 44 (frézovaný zápis).



Obr. 53 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 můžou mít různý tvar profilu (blejzovaný, pila, nepravidelný), různou hloubku i různý počet výškových úrovní.

3.3.4 Diskuze

Byly představeny možnosti expozice pomocí elektronového svazku do bloku plexiskla jako náhrada za běžně používanou soustavu rezist/substrát jako nová možnost vytváření hlubokých (několik mikrometrů) DOE pomocí reliéfní elektronové litografie. Tento způsob přípravy DOE eliminuje obtíže spojené s nanášením a expozicí hlubokých rezistových vrstev na substrátech (křemík, skleněná maska apod.). Na druhou stranu je nutné při expozici do bloku plexiskla řešit otázky s odvodem náboje během expozice elektronovým svazkem a s odvodem vznikajícího tepla. Zároveň je nutné zvolit vhodný typ plexiskla, protože plexisklo není příliš odolné vůči některým typům rozpouštědel, které se v elektronové litografii používají jako vývojky. Kvůli způsobu výroby plexiskla se nedá předpokládat, že čistota materiálu bude v takové kvalitě jako nanášené rezistové vrstvy na substráty. Postup přípravy DOE do bloku plexiskla byl publikován v [112].

Pro zvýšení homogenity exponovaného motivu a zmírnění zátěže během expozice elektronovým svazkem byla vyvinuta metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí. Tato metoda ve srovnání s běžnými způsoby expozice zaručuje srovnatelnou dobu přípravy expozičních dat a v některých případech vede ke zkrácení expoziční doby. Dále ve srovnání s běžnými způsoby zápisu snižuje tepelnou zátěž rezistu (případně bloku plexiskla) během expozice tím, že expoziční dávku v daném místě rozdělí do více nižších dávek. Zároveň výrazně zvyšuje homogenitu exponovaných motivů ve srovnání s běžnými způsoby zápisu. Potlačuje tak nedokonalosti projevující se nehomogenním osvětlením elektronovým svazkem v rámci expozičního pole. Na druhou stranu je přesnost této metody silně závislá na přesnosti a stabilitě expozičního systému. Nicméně použití metody se uvažuje především při vytváření hlubokých vícevrstevných DOE, kde není vyžadována laterální přesnost vyšší než několik desítek nanometrů. Celková přesnost se dá dále zvýšit vhodným rozdělením motivu na menší části. U achromatických struktur, kde je vyžadována určitá míra šumu, může být tato metoda spíše nežádoucí.

V další části byla představena metoda výpočtu PEC pro určité typy struktur, která je založena na aproximaci existujících modelů pro výpočet PEC. Metoda zaručuje eliminaci zdlouhavých výpočtů PEC za cenu minimální deviace expozičních dávek získaných právě pomocí standardních modelů pro výpočet PEC. Metoda je efektivním nástrojem především při přípravě komplexních DOE obsahujících velký počet různých typů struktur (lišících se tvarem profilu a hloubkou). Ve spojení s představenými možnostmi expozice do bloků plexiskla, kde pro daný způsob vyvolání potřebujeme pouze jednu křivku citlivosti pro jakkoliv hluboké struktury, umožňuje celkově efektivnější přípravu velkoplošných motivů obsahujících hluboké víceúrovňové DOE. Metoda pro výpočet PEC a metoda frézovaného zápisu s kvazi-nepravidelným umístěním expozičních polí byly implementovány do softwaru pro přípravu expozičních dat bezpečnostních hologramů a jiných typů DOE [113].

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 dva kroky vyvolání rezistu vzájemně neovlivňovaly. Tuto variantu je možné využít i při expozici pouze jedním systémem, kdy se rozdělením celého motivu do dvou částí (většinou podle hloubek profilu mikrostruktur) zvýší možnosti ladění struktur během vyvolání. 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. Kombinace expozic těchto dvou systémů naráží na limity systému BS600 z hlediska stability pro několikahodinové expozice a přesnosti pojezdů stolů. 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).

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 nejjednodušších 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 střidy 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. Presentovaný způsob optimalizace je tedy vhodnější pro přípravu bezpečnostních hologramů a jednodušších CGH, kde je důležitý celkový obrazový vjem. Pro DOE, které mají sloužit k velmi přesné změně dopadajícího laserového svazku, metoda vhodná není, protože může vést k výrazně negativní změně jeho optické funkce.

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. Nutné je také nanesení vodivé vrstvy pro odvod náboje během expozice elektronovým svazkem, podobně jako při expozici na skleněné masky. Dále je nutné využít optimalizovaný způsob zápisu pro minimalizaci teplotní zátěže během expozice. Pro tyto účely byla vyvinuta metoda zápisu, která motivy exponuje po vrstvách exponovaných přes sebe, čímž se zároveň zvyšuje homogenita připravených motivů. V případě DOE to vede ke snížení účinnosti neužitečných difrakčních řádů. Na druhou stranu

je přesnost tohoto způsobu expozice silně závislá na přesnosti a stabilitě expozičního systému. 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 snižuje čas potřebný ke stanovení expozičních dávek prakticky na nulu. Přesnost metody přímo závisí na přesnosti aproximovaného modelu pro výpočet PEC. Metoda má kromě omezení, které plyne z aplikace pouze na určitý typ struktur, také limity na rozhraní mezi dvěma výrazně odlišnými typy struktur.

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

Další práce spojená s tématy řešenými v této práci by se mohla zabývat následující problematikou. V případě metody kombinované litografie by bylo vhodné vyřešit možnost expozice mezi značky tak, aby rastrování přes značky neovlivňovalo, případně doplňovalo, expozici zamýšlených motivů. Zvýšila by se tak přesnost soukrytu expozic z různých typů systémů. Optimalizace hranic objektů exponovaných motivů z obrazových vstupů by se mohla soustředit na vlastní přístup optimalizace, který by měl uživatel více pod kontrolou, především z hlediska zachování střidy vytvářených motivů. Užitečná by samozřejmě byla i možnost aplikace tohoto způsobu optimalizace na víceúrovňové struktury při standardním způsobu zápisu. U přípravy DOE do bloků plexiskla by se mohl blíže prozkoumat rozdíl v hustotě absorbované energie (a s tím související rozdíl v citlivosti) při standardním a frézovaném způsobu zápisu. Tím by bylo možné ověřit či vyvrátit hypotézu, že příčinou zmíněného rozdílu je akumulace náboje v objemu rezistu a časová prodleva mezi jeho odvodem a další expozicí v blízkosti již exponovaného místa. Metoda pro výpočet PEC pomocí aproximace stávajícího modelu by mohla být zkoumána z hlediska zvyšování její přesnosti a případného využití na další typy struktur.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] RAI-CHOUDHURY, P. *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication, Volume 1: Microlithography*. Washington: SPIE, 1997, 768 s. ISBN 0-85296-906-6.
- [2] HAHMANN, P., FORTAGNE, O. 50 Years of Electron Beam Lithography: Contributions from Jena (Germany). *Microelectronic Engineering*. 2009, vol. 86, No. 4-6, P. 438-441. ISSN 0167-9317.
- [3] STEPANOVA, M., DEW, S. *Nanofabrication: Techniques and Principles*. Viena: SPRINGER, 2012. 344 s. ISBN978-3-7091-0424-8.
- [4] TENNANT, D., M. Progress and Issues in E-beam and Other Top Down Nanolithography. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 2013, vol. 31, No. 5. ISSN 0734-2101.
- [5] LAWERS, R., A. Future Trends in High-resolution Lithography. *Applied Surface Science*. 2000, vol. 154, p. 519-526. ISSN 0169-4332.
- [6] HAHMANN, P. et al. High Resolution Patterning – Preparation of VSB Systems for 22 nm Node Capability. *Microelectronic Engineering*. 2010, vol. 87, No. 5-8, p. 1077-1081. ISSN 0167-9317.
- [7] STEEN, S. et al. Hybrid Lithography: The Marriage Between Optical and E-beam Lithography. A method To Study Process Integration and Device Performance for Advanced Device Nodes. *Microelectronic Engineering*. 2006, vol. 83, No. 4-9, p. 754-761. ISSN 0167-9317.
- [8] BROERS, A., N. et al. Electron Beam Lithography – Resolution Limits. *Microelectronic Engineering*. 1996, vol. 32, No. 1-4, p. 131-142. ISSN 0167-9317.
- [9] VIEU, C. et al. Electron Beam Lithography: Resolution Limits and Applications. *Microelectronic Engineering*. 2000, vol. 164, No. 1-4, p. 111-117. ISSN 0169-4332.

- [10] MANFRINATO, V., R. et al. Determining the Resolution Limits of Electron-Beam Lithography: Direct Measurement of the Point-Spread Function. *Nano Letters*. 2014, vol. 14, No. 8, p. 4406-4412. ISSN 1530-6984.
- [11] JIANG, N. On the Spatial Resolution Limit of Direct-write Electron Beam Lithography. *Microelectronic Engineering*. 2017, vol. 168, p. 41-44. ISSN 0167-9317.
- [12] LIN, B., J. Succeeding Optical Lithography with Multiple E-beam Direct Write. In *Microprocesses and Nanotechnology 2007, Digest of Papers*. Kyoto: IEEE, 2007, p. 416-417. ISBN 978-4-9902472-4-9.
- [13] YANG, H. et al. Low-energy Electron-beam Lithography of Hydrogen silsesquioxane. *Microelectronic Engineering*. 2005, vol. 83, No. 4-9, p. 788-791. ISSN 0167-9317.
- [14] BOK, J. et al. Modified Knife-edge Method for Current Density Distribution Measurement in E-beam Writers. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2013, vol. 31, No. 3, p 031603-031608. ISSN 1071-1023.
- [15] BRANDSTÄTTER, CH., DÖRING, H., REIMER, K. *Projection Maskless Lithography (PML2), Technology – Results*. SEMATECH ML2 Workshop. San Jose: 2005.
- [16] TEO, K., B., K. et al. Fabrication and Electrical Characteristics of Carbon Nanotube-based Microcathodes for Use in a Parallel Electron-beam Lithography System. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2003, vol. 21, No. 2, p. 693-697. ISSN 1071-1023.
- [17] KUANG, J., YOUNG, E. Row Structure Stencil Planning Approaches for E-beam Lithograph with Overlapped Characters. *Integration, the VLSI journal*. 2016, vol. 55, p. 232-245. ISSN 0167-9260.
- [18] PLATZGUMMER, E., KLEIN, C., LOESCHNER, H. Electron Multibeam Technology for Mask and Wafer Writing at 0.1 nm Address Grid. *Journal of Micronanolithography MEMS and MOEMS*. 2013, vol. 12, No. 3. ISSN 1932-5150.

- [19] CHEN, A., J., J., H et al. Future Electron-Beam Lithography and Implications on Design and CAD Tools. *2011 16th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*. Yokohama: IEEE, 2011. ISBN 978-1-4244-7516-2.
- [20] SLODOWSKI, M. et al. Multi Shaped Beam: Development Status and Updates on Lithography Results. In *Proceedings of Conference on Alternative Lithographic Technologies III*. San Jose: SPIE, 2011, vol. 7970. ISBN 978-0-81948-529-8.
- [21] HOULI, B., UMANSKY, V., HEIBLUM, M. Low-energy electron beam lithography with 30 nm resolution. *Semiconductor Science and Technology*. 1993, vol. 8, No. 7, p. 1490-1492. ISSN 0268-1242.
- [22] KOZAWA, T. et al. Effects of Low Energy Electrons on Pattern Formation in Chemically Amplified Resist. *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2006, vol. 19, No. 3, p. 361-366. ISSN 0914-9244.
- [23] HORDON, L., S. et al. Limits of Low-energy-electron Optics. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1993, vol. 11, No. 6, p. 2299-2303. ISSN 1071-1023.
- [24] MATĚJKA, F. *Praktická elektronová litografie*. Brno: ÚPT AV ČR, v.v.i., 2013. 88 s. ISBN 978-80-87441-04-6.
- [25] ISHII, K., MATSUDA, T. Very-Low-Energy Electron Beam Lithography Using a Retarding Field. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1*. 1990, vol. 29, No. 10, p. 2212-2215. ISSN 0021-4922.
- [26] MARRIAN, C., R., K., DOBISZ, E., A., DAGATA, J., A. Electron-Beam Lithography with the Scanning Tunneling Microscope. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1992, vol. 10, No. 6, p. 2877-2881. ISSN 1071-1023.
- [27] MARRIAN, C., R., K. Low-Voltage Electron-Beam Lithography in Self-Assembled Ultrathin Films with the Scanning Tunneling Microscope. *Applied Physics Letters*. 1994, vol. 64, No. 3, p. 390-392. ISSN 0003-6951.
- [28] BROCK, D., C. *Patterning the World: The Rise of Chemically AMplified Photoresists* [online]. 2007 [cit. 11-01-2017]. Dostupné z:

<<https://www.chemheritage.org/distillations/magazine/patterning-the-world-the-rise-of-chemically-amplified-photoresists>>.

- [29] HENDERSON, C., L. *Introduction to Chemically Amplified Photoresists* [online]. 2017 [cit. 11-01-2017]. Dostupné z: <<https://sites.google.com/site/hendersonresearchgroup/helpful-primers-introductions/introduction-to-chemically-amplified-photoresists>>.
- [30] MACK, C. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2007, 534 s. ISBN 978-0-470-01893-4.
- [31] KUDRYASHOV, V., A. et al. Electron Beam Lithography Using Chemically-amplified Resist: Resolution and Profile Control. *Microelectronic Engineering*. 1996, vol. 30, No. 1-4, p. 305-308. ISSN 0167-9317.
- [32] YANG, D., X. Performance of a High Resolution Chemically Amplified Electron Beam Resist at Various Beam Energies. *Microelectronic Engineering*. 2016, vol. 155, p. 97-101. ISSN 0167-9317.
- [33] WU, W., PRABHU, V., M., LIN, E., K. Identifying Materials Limits of Chemically Amplified Photoresists. *Advances in Resist Materials and Processing Technology XXIV*. San Jose: SPIE, 2007. Vol. 6519, p 51902-1 - 51902-11. ISSN 0277-786X.
- [34] BULKGAKOVA, S., A. et al. Chemically Amplified Resists for High-Resolution Lithography. *Russian Microelectronics*. 2013, vol. 42, No. 3, p. 165-175. ISSN 1063-7397.
- [35] YANG, Y. et al. Layout Decomposition Co-optimization for Hybrid E-Beam and Multiple Patterning Lithography. *IEEE Transactions on Computer-aided Design of integrated Circuits and Systems*. 2016, vol. 35, No. 9, p. 1532-1545. ISSN 0278-0070.
- [36] HOHLE, C. et al. Evaluation of hybrid lithography and mix and match scenarios for electron beam direct write applications. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2007, vol. 25, No. 6, p. 2038-2040. ISSN 1071-1023.

- [37] OCHIAI, Y. et al. Lithographic Performance and Mix-and-Match Lithography Using 100 kV Electron Beam System JBX-9300FS. *JEOL News*. 2001, vol. 36, No. 1, p. 22-24.
- [38] MOLLARD, L. et al. HSQ hybrid lithography for 20 nm CMOS devices development. *Microelectronic Engineering*. 2002, vol. 61-2, p. 755-761. ISSN 0167-9317.
- [39] GUILLORN, M. et al. Hydrogen silsesquioxane-based hybrid electron beam and optical lithography for high density circuit prototyping. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2009, vol. 27, No. 6, p. 2588-2592. ISSN 1071-1023.
- [40] MAGOSHI, S. et al. Improved Electron-Beam/Deep-Ultraviolet Intralevel Mix-and-Match Lithography with 100 nm Resolution. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1*. 1999, vol. 38, No. 4A, p. 2169-2172. ISSN 0021-4922.
- [41] JONCKHEERE, R. Electron beam / DUV intra-level mix-and-match lithography for random logic 0.25 μ m CMOS. *Microelectronic Engineering*. 1995, vol. 27, No. 1-4, p. 231-234. ISSN 0167-9317.
- [42] NARIHIRO, M. et al. Intra-Level Mix-and-Match Lithography Process for Fabricating Sub-100-nm Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Devices using the JBX-9300FS Point-Electron-Beam System. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1*. 2000, vol. 39, No. 12B, p. 6843-6848. ISSN 0021-4922.
- [43] GenISys GmbH. *TRACER v2.3.0 Manual*. Munich: GenISys GmbH, 2014.
- [44] 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>>.
- [45] SEO, E., CHOI, B., K., KIM, O. Determination of proximity effect parameters and the shape bias parameter in electron beam lithography. *Microelectronic Engineering*. 2000, vol. 53, No. 1-4, p. 305-308. ISSN 0167-9317.

- [46] OUABBOU, A., et al. Proximity Effects in Electron Beam Lithography in SAL 601 Resists on a Si-SiO₂-Si Substrate. *Microelectronic Engineering*. 1993, vol 20, no. 4, p. 255-275. ISSN 0167-9317.
- [47] WÜEST, R., Proximity-effect Induced Density limitations for Electron-beam Patterned Planar Photonic Nanomaterials. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. 2009, vol. 7, no. 4, p. 212-219. ISSN 1569-4410.
- [48] YESILKOY, F., et al. Implementation of E-Beam Proximity Effect Correction using Linear Programming Techniques for the Fabrication of Asymetric Bow-tie Antennas. *Solid-State Electronics*. 2010, vol. 54, no. 10, p. 1211-1215. ISSN 0038-1101.
- [49] RAPTIS, I., Electron Beam Lithography Simulation for High Resolution and High-density Patterns. *Vacuum*. 2001, vol. 62, no. 2-3, p. 263-271. ISSN 0042-207X.
- [50] VUTOVA, K. Process Simulation at Electron Beam Lithography on Different Substrates. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, vol. 184, no. 1-3, p. 305-311. ISSN 0924-0136.
- [51] UDALAGAMA, C., N., B. et al. A Monte Carlo Study of the Extent of Proximity Effects in E-beam and P-beam Writing of PMMA. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B*. 2007, vol. 260, no. 1, p. 384-389. ISSN 0168-583X.
- [52] URBANEK, M., KRATKY, S. et al. Monte Carlo Simulation of Proximity Effect in E-beam Lithography. In *Proceedings of the 5th International Conference NANOCON 2013*. Ostrava: Tanger Ltd., 2013. ISBN 978-80-87294-44-4.
- [53] WATSON G. P., et al. Measurement of the Backscatter Coefficient Using Resists Response Curves for 20-100 keV Electron Beam Lithography on Si. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1996, vol. 14, no. 6, p. 4277-4282. ISSN 1071-1023.
- [54] HAUPTMANN, M. et al. Determination of Proximity Effect Parameters by Means of CD-linearity in Sub 100 nm Electron Beam Lithography. *Microelectronic Engineering*. 2009, vol. 86, no. 4-6, p. 539-543. ISSN 0167-9317.

- [55] DAI, Q. et al. Experiment-based Estimation of Point Spread Function in Electron-beam Lithography: Forward-scattering Part. *Microelectronic Engineering*. 2011, vol. 88, no. 10, p. 3054-3061. ISSN 0167-9317.
- [56] UNAL, N. *BEAMER – Electron Beam Lithography Software Advanced Training*. Munich: GenISys GmbH, 2014. 319 pages.
- [57] BOLTEN, J. et al. Improved CD control and Line Edge Roughness in E-beam Lithography Through Combining Proximity Effect Correction with Gray Scale Techniques. *Microelectronic Engineering*. 2010, vol. 87, no. 5-8, p. 1041-1043. ISSN 0167-9317.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] MATĚJKA, M., KRÁTKÝ, S. et al. Variable Shape E-beam Lithography: Proximity Effect Simulation of 3D Micro and Nano Structures. In *Proceedings of the 4th International Conference NANOCON 2012*. Ostrava: TANGER Ltd., 2012, p. 729-732. ISBN 978-80-87294-32-1.
- [62] KIRCHNER, R. et al. ZEP520A – A resist for electron-beam grayscale lithography and thermal reflow. *Microelectronic Engineering*. 2016, vol. 153, no. SI, p. 71-76. ISSN 0167-9317.
- [63] DUPAS, C., LAHMANI, M. *Nanoscience: Nanotechnologies and Nanophysics*. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007, 823 s. ISBN 3-540-28616-0.
- [64] ABBAS, A. *Nanofabrication Using Electron Beam Lithography: Novel Resist and Applications* – Master thesis. Waterloo, Canada, 2013, 73 s.

- [65] BERMUDEZ, V. M. Low-energy electron-beam effects on poly(methyl methacrylate) resist films. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1999, vol. 17, no. 6, p. 2512-2518. ISSN 1071-1023.
- [66] CUI, Z. *Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits*. New York: Springer Science & Business Media, 2008, 343 s. ISBN 978-0-387-75576-2.
- [67] Microchemicals. *Spin-coating* – application notes [online]. [cit. 20-02-2020].
Dostupné z:
<https://www.microchemicals.com/technical_information/spin_coating_photoresist.pdf>.
- [68] Microchemicals. *Photoresist Coating Techniques* – application notes [online]. [cit. 20-02-2020].
Dostupné z:
<https://www.microchemicals.com/technical_information/photoresist_coating.pdf>.
- [69] ATTHI, N. et al. Improvement of Photoresist film Coverage on High Topology Surface with Spray Coating Technique. *Journal of the Microscopy Society of Thailand*. 2010, vol. 24, no. 1, p. 42-46. ISSN 2228-9038.
- [70] KOLARIK, V. Towards the Sub-100nm E-beam Writing System. In *Proceedings of NANO '05 Conference*. Brno: VUT, 2005, p. 116. ISBN 80-214-3044-3.
- [71] MATEJKA, F. et al. Reducing the Size of a Rectangular-Shaped Electron Beam in E-Beam Writing System. In *Proceedings of the 8th Multinational Congress on Microscopy*. Praha: CMS, 2007, p. 87-88. ISBN 978-80-239-9397-4.
- [72] KOLARIK, V., KRATKY, S. et al. What Is the Buzz about the TZ Mode. In *Proceedings of the 13th International Seminar on Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation*. Brno ISI AS CR, v.v.i., 2012, p. 37-38. ISBN 978-80-87441-07-7.
- [73] KOLARIK, V., KRATKY, S. 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.

- [74] MATEJKA, F. Elektronový Litograf BS600 a Jeho Technologické Aplikace. *Zpravodaj ÚPT ČAV*. 1988, 46 s.
- [75] Vistec Lithography B.V. *Vistec EBPG5000+ ES Lithography System, Specification and Acceptance Test*. Best: Vistec Lithography B.V. 2010. 34 s.
- [76] GenISys GmbH. *BEAMER v5.9.0 Manual*. Munich: GenISys GmbH, 2019.
- [77] Vistec Lithography B.V. *Generic Pattern Generator and Format*. Best: Vistec Lithography B.V. 2012. 79 s.
- [78] O'SHEA, D., C. et al. *Diffraction Optics: Design, Fabrication and Test*. Washington: SPIE Press, 2004, 241 s. ISBN 0-8194-5171-1.
- [79] Thorlabs Inc. *Parameters of diffraction gratings* [online]. [cit. 24-08-2020]. 2020. Dostupné z <<https://www.thorlabs.com/catalogpages/808.pdf>>.
- [80] RENESSE, L. van, R. *Optical Document Security*. Boston/London: Artech House, 2005, 366 s. ISBN 1-58053-258-6.
- [81] ALSAKA, D., Y., ARPALI, C., ARPALI, S., A. A comparison of iterative Fourier transform algorithms for image quality estimation. *Optical Review*. 2018, vol. 25, no. 5, p. 625-637. ISSN 1340-6000.
- [82] MILER, M. *Fyzika a holografické difrakční struktury*. Praha: Jednota Československých matematiků a fyziků, 1988, 146 s.
- [83] FLUCKIGER, D. *GSolver Version 5.2 User's Guide*. Allen: Grating Solver Development Company, 2012, 131 s.
- [84] YASIN, S., et al. UVIII for combined e-beam and optical exposure hybrid lithography. *Microelectronic Engineering*. 2005, vol. 78-79, no. SI, p. 47-50. ISSN 0167-9317.
- [85] HORÁČEK, M., KRÁTKÝ, S., URBÁNEK, M. et al. Exposure Time Comparison between E-beam Writer with Gaussian Beam and Variable Shaped Beam. In *Proceedings of the 6th International Conference NANOCON 2014*. Ostrava: TANGER Ltd., 2014. ISBN 978-80-87294-55-0.

- [86] 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.
- [87] KRÁTKÝ, S. et al. Comparison of Ultimate Resolution Achieved by E-beam Writers with Shaped Beam and with Gaussian Beam. In *Proceedings of the 5th International Conference NANOCON 2013*. Ostrava: TANGER Ltd., 2013. ISBN 978-80-87294-44-4.
- [88] KRÁTKÝ, S. et al. E-beam Nano-patterning for Electroforming Replication. In *Proceedings of the 6th International Conference NANOCON 2014*. Ostrava: TANGER Ltd., 2014. ISBN 978-80-87294-55-0.
- [89] BOLTEN, J. et al. At low costs: Study on optical propagation losses of silicon waveguides fabricated by electron beam lithography. *Microelectronic Engineering*. 2014, vol. 123, no. SI, p. 1-3. ISSN 0167-9317.
- [90] HORÁČEK, M., KNÁPEK, A., KRÁTKÝ, S. et al. Hiding e-beam exposure fields by deterministic 2D patterning. In *Proceedings of the 16th International Seminar of Recent Trends in Charged Particle Optics and Surface Physics Instrumentation*. Brno: Institute of Scientific Instruments The Czech Academy of Sciences, 2018, p. 36-37. ISBN 978-80-87441-23-7.
- [91] KOLAŘÍK, V. *Expozice mezi značky (4U12e) – Dílčí zpráva výzkumného projektu FR-TI1/576*. Brno: ÚPT AV ČR. 2011. 20 s.
- [92] WIJNANDS, M. *EBPG5000Plus Operation Training Total_V3*. Best: Vistec Lithography B.V. 2013. 396 p.
- [93] KRÁTKÝ, S. et al. Combined e-beam lithography using different energies. *Microelectronic Engineering*. 2017, vol. 177, no. SI, p. 30-34. ISSN 0167-9317.
- [94] 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.

- [95] KOLAŘÍK, V., HORÁČEK, M., KRÁTKÝ, S. Structural Color of Metallic Surfaces. In *Proceedings of the 23th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2014*. Ostrava: TANGER Ltd., 2014, p. 962-967. ISBN 978-80-87294-52-9.
- [96] HALPIN, P. *Dog logo 2* [online]. [cit. 11-07-2020]. 2019. Dostupné z <<https://dribbble.com/shots/8663531-Dog-Logo-2>>.
- [97] BRUNN, O., KRÁTKÝ, S., HORÁČEK, M. *Aparatura pro měření difrakční účinnosti a vyzařovací charakteristiky*. Funkční vzorek, 2019.
- [98] 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.
- [99] SCHIRMER, M. et al. *Conductive top layer for e-beam lithographie for all e-beam resist (Electra 92)*. Strausberg: Allresist GmbH, 2016. 1 s.
- [100] Engineering Toolbox. *Thermal Conductivity of selected Materials and Gases* [online]. [cit. 10-08-2020]. 2013. Dostupné z <https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html>.
- [101] United States Plastic Corporation. *What are the benefits and advantages when comparing Cast acrylic and Extruded acrylic?* [online]. [cit. 11-08-2020]. 2020. Dostupné z <<https://www.usplastic.com/knowledgebase/article.aspx?contentkey=887>>.
- [102] 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/>>.
- [103] Induflex A/S. *Cast acrylic versus extruded acrylic* [online]. [cit. 11-08-2020]. 2020. Dostupné z <https://www.pmma.dk/Acryl_stobt_kontra_ekstruderet.aspx?lang=en-GB>.
- [104] Regal Plastics. *Acrylic Sheet: Cast vs. Extruded and Paper vs. Film* [online]. [cit. 11-08-2020]. 2018. Dostupné z <<https://www.regal-plastics.com/blog/acrylic-sheet-cast-vs-extruded-paper-vs-film/>>.

- [105] Sigma Aldrich. *Gold etchant, standard* [online]. [cit. 20-08-2020]. 2020. Dostupné z <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/651818?lang=en®ion=CZ>.
- [106] KUZMIN, Y., I., MACK, C., A. Comprehensive simulation of e-beam lithography processes using PROLITH/3D and TEMPTATION software tools. In *Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers (SPIE)*. Monterey, 2000, p. 503-507.
- [107] YASUDA, M. et al. Resist Heating Effect in Electron-Beam Lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1994, vol. 12, no. 3, p. 1362-1366. ISSN 1071-1023.
- [108] BABIN, S., HARTMANN, H, KUZMIN, Y., I. Simulation and measurement of resist heating in multipass exposure using a 50 kV variably shaped beam system. *Microelectronic Engineering*. 1999, vol. 46, no. 1-4, p. 231-234. ISSN 0167-9317.
- [109] ARAT, K., T. et al. Charged-induced pattern displacement in E-beam lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2019, vol. 37, no. 5, p. 051603- 1-10. ISSN 2166-2746.
- [110] ITOH, H., NAKAMURA, K., HAYAKAWA, H. Charging effect on trilevel resist with an e-beam lithography system. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1990, vol. 8, no. 6, p. 1893-1897. ISSN 1073-1023.
- [111] AASSIME, A. et al. Anti-charging process for electron beam observation and lithography. *Microelectronic Engineering*. 2013, vol. 110, p. 320-323. ISSN 0167-9317.
- [112] 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.
- [113] 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.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<i>2D-FFT</i>	dvourozměrná rychlá Fourierova transformace (z anglického <i>2D fast Fourier-transform</i>)
<i>AFM</i>	mikroskop atomárních sil (z anglického <i>atomic force microscope</i>)
<i>BSS</i>	krok mezi jednotlivými záblesky svazku (z anglického <i>beam step size</i>)
<i>CAR</i>	chemicky zesílený rezist (z anglického <i>chemically amplified resist</i>)
<i>CGH</i>	počítačem generovaný hologram (z anglického <i>computer generated hologram</i>)
<i>DOE</i>	difrakční optický element (z anglického <i>diffractive optical element</i>)
<i>EBL</i>	elektronová litografie (z anglického <i>electron beam lithography</i>)
<i>HSQ</i>	hydrogen silsesquioxane
<i>IFTA</i>	iterativní algoritmus Fourierovi transformace (z anglického <i>iterative Fourier-transform algorithm</i>)
<i>IPA</i>	izopropylalkohol
<i>LST</i>	míra optimalizace modifikace hranic objektů (z anglického <i>layout smoothing tolerance</i>)
<i>MBS</i>	vícesvazkový systém (z anglického <i>multibeam system</i>)
<i>MIBK</i>	methylišobutylketon
<i>MMA</i>	methylmethakrylát
<i>MSBS</i>	vícesvazkový systém s tvarovaným svazkem (z anglického <i>multi-shaped-beam system</i>)
<i>nAAc</i>	n-amylester kyseliny octové
<i>PEC</i>	korekce jevu blízkosti (z anglického <i>proximity effect correction</i>)
<i>PMMA</i>	polymethylmethakrylát
<i>SEM</i>	rastrovací elektronový mikroskop (z anglického <i>scanning electron microscope</i>)
<i>ST</i>	standardní expoziční mód systému Tesla BS600
<i>TZ</i>	expoziční mód technologického zoomu systému Tesla BS600
<i>UV</i>	ultrafialový (z anglického <i>ultraviolet</i>)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a_{px}	rozlišení jednoho pixelu bitmapy
A_{N}	amplituda signálu
α	dosah dopředně rozptýlených elektronů
β	dosah zpětně odražených elektronů
γ	kontrast rezistu
$ d_{\text{AB}} $	vzdálenost vyhodnocovaného bodu od spojnice mezi jeho dvěma sousedními body
D	expoziční dávka
D_0	citlivost rezistu
D_{lev}	expoziční dávka výškové úrovně
$D_{\text{lev-dev}}$	rozdíl expozičních dávek výškových úrovní získaných jinou aproximací
$D_{\text{lev-dev-avg}}$	průměrný rozdíl expozičních dávek výškových úrovní získaných jinou aproximací
e	elementární náboj elektronu
E_0	energie elektronů primárního svazku
E_{a}	hustota absorbované energie
g	degradační účinnost rezistu
h	tloušťka rezistu
h_{lev}	hloubka výškové úrovně
h_{stru}	hloubka struktury
H	homogenita užitečných difrakčních řádů
η	poměr absorbované energie zpětně odražených elektronů vůči dopředně rozptýleným elektronům
η_{ef}	celková účinnost užitečných difrakčních řádů
$\eta_{\text{s}}, \eta_{\text{s-ef}}$	difrakční účinnost nejsilnějšího parazitního řádu (<i>stray light</i>)
η_0	difrakční účinnost nultého difrakčního řádu
I	intenzita
L_{count}	počet exponovaných vrstev
λ	vlnová délka

A	perioda mřížek
m	počet pojezdů všech stolů, počet všech subpolí
M	molární hmotnost
n_i	počet všech razítek v expozici
N_A	Avogadrova konstanta
o	počet všech trapezoidů
p	počet pojezdů všech stolů
P	pozice na substrátu
Q	expoziční dávka
r	vzdálenost od místa dopadu elektronu
R_g	dolet elektronů (Grünův dolet)
ρ	měrná hmotnost látky
s_x, s_y	horizontální resp. vertikální rozměr expozičního pole
t_{EXPO}	celkový expoziční čas
t_{prep}	doba přípravy expozičních dat
T_{beam}	čas osvitů jednoho razítka
T_{overhead}	režijní čas jednoho razítka
T_{stage}	čas pojezdu jednoho stolu
T_{sub}	režijní čas jednoho subpole
T_{trap}	režijní čas jednoho trapezoidu
V	rychlost rozpouštění rezistu
w	tloušťka rezistu, přesnost překryvu exponovaných vrstev
X	horizontální souřadnice
Y	vertikální souřadnice
φ_N	fázová složka obrazu
Z	penetrační hloubka

SEZNAM PŘÍLOH

- A** **Vliv tvaru profilu periodických struktur na rozložení difrakční účinnosti**
- B** **Snímky motivu připraveného pomocí kombinované reliéfní elektronové litografie**
- C** **Výsledek optimalizace vybraných vstupních bitmap s různým rozlišením pro různé hodnoty *LST***
- D** **Expoziční data po aplikaci různé míry optimalizace na vstupní bitmapu s různým rozlišením**
- E** **Srovnání doby přípravy expozičních dat pro různé typy motivů s různým rozlišením vstupních bitmap a různou mírou optimalizace**
- F** **Srovnání expoziční doby pro různé typy motivů s různým rozlišením vstupních bitmap a různou mírou optimalizace**
- G** **Snímky ze SEM motivu *CGH-60°* s různým rozlišením vstupních bitmap a různou mírou optimalizace**
- H** **Srovnání teoretických hodnot optických parametrů různých typů DOE**
- I** **Srovnání naměřených hodnot optických parametrů různých typů DOE**
- J** **Srovnání teoretických signálů se snímky skutečných rekonstruovaných signálů pro různé typy motivů s různou mírou optimalizace a různým rozlišením vstupních bitmap**
- K** **Snímky motivu *frakt* pro různá rozlišení vstupních bitmap a pro různou míru optimalizace**
- L** **Přesnost sesazení expozic pro různý počet přeběhů**
- M** **Srovnání homogenity achromatického motivu pro různé způsoby zápisu**
- N** **Expoziční dávky pro mikrostruktury s různým tvarem profilu a různou topologií**
- O** **Expoziční dávky potřebné pro stanovení korekce expoziční dávky pro různé hloubky mikrostruktury pro metodu výpočtu PEC**

- P Srovnání přesnosti výpočtu expozičních dávek pomocí aproximační metody pro výpočet expozičních dávek s referenčním modelem pro výpočet PEC**