

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

**RELIÉFNÍ DIFRAKTIVNÍ STRUKTURY
PRO OPTICKÉ ELEMENTY
REALIZOVANÉ POMOCÍ
ELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Lukáš Daněk

BRNO 2009

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

**RELIÉFNÍ DIFRAKTIVNÍ STRUKTURY
PRO OPTICKÉ ELEMENTY
REALIZOVANÉ POMOCÍ
ELEKTRONOVÉ LITOGRAFIE**

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.)

ve studijním oboru

MIKROELEKTRONIKA

Ing. Lukáš Daněk

Školitel: Doc. Ing. Vladimír Kolařík, Ph.D.

Datum státní doktorské zkoušky: 15. května 2004

Datum odevzdání práce: prosinec 2008

(revize: září 2009)

Práce je k dispozici na Vědeckém oddělení
děkanátu FEKT VUT v Brně,
Údolní 53, Brno, 602 00

Tato disertační práce byla vypracována v

Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.,

akreditovaném pro doktorský studijní program

“Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika“

rozhodnutím MŠMT ze dne 13. 3. 2003,

pod vedením

doc. Ing. Vladimíra Kolaříka, Ph.D.

Abstrakt

Náplní práce autora byla příprava a realizace různých základních difrakčních struktur, které se dále použily při vytváření celých difrakčních optických elementů pro různé aplikace. Tyto struktury a optické elementy jsou vytvářeny pomocí technologie reliéfní elektronové litografie s využitím litografu s tvarovaným svazkem.

Elektronový litograf s tvarovaným svazkem BS600 vyvinutý a vyrobený na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR v Brně byl původně určen pro výrobu masek pro integrované obvody případně pro přímou litografii pomocí tvarovaného elektronového svazku. Aplikace elektronové litografie v oblasti difrakčních optických elementů přinesla celou řadu nových požadavků na vlastnosti vlastního přístroje i potřebu zásadních změn v oblasti technologie a programového vybavení. Hlavním problémem je skloubení realizace (difrakčních) struktur se submikronovým rozlišením na relativně velké ploše v řádu deseti cm^2 (optické elementy). Charakter práce je tedy významně interdisciplinární, zahrnující výše zmíněné oblasti včetně softwarového inženýrství.

Cíle autorovy práce je možné shrnout do těchto oblastí. Optimalizace vlastností stávajících struktur (např. difrakčních mřížek a Fourierovských struktur) a elementů z hlediska optických vlastností a z hlediska rychlosti realizace, tedy doby expozice elektronovým litografem. Vývoj a realizace nových typů struktur a elementů (zejména zonálních) včetně optimalizace jejich parametrů. Návrh algoritmu pro vyhodnocování dat snímaných detektorem sekundárních elektronů a realizace uživatelského prostředí pro kalibraci elektronového litografu využívající navrženého algoritmu.

Při řešení těchto úkolů se autor zaměřil zejména na rozsáhlou experimentální činnost. Tato činnost spočívala jednak v realizaci struktur a elementů i vyhodnocení jejich vlastností a jednak v programovém řešení v oblastech přípravy dat a datových struktur.

Přínosem celé autorovy práce je výrazná kvalitativní změna realizovaných struktur a celých optických elementů. Ve spojení s dalšími výsledky ostatních členů týmu dosáhla popisovaná technologie požadovaného stupně zralosti, komerčního využití a ocenění v národním i celosvětovém měřítku.

Abstract

The work in the lab of electron-beam lithography (EBL) in the Institute of Scientific Instruments of the Academy of Sciences of Czech Republic is mainly to prepare large diffractive structures. These diffractive optical elements are used mostly as laser beam-forming elements and elements for industrial holography applications. The work was mainly focused to the preparation of data for the lithography writer. However, generators of data were also prepared. These generators of data for diffractive structures are here described.

The electron beam writer BS600 used in EBL was developed in the Institute of Scientific Instruments of the Academy of Sciences of Czech Republic and allows setting rectangular shape of the beam. The e-beam writer BS600 was originally developed for the Tesla Company, for microchip masks production. The use of the e-beam writer BS600 for the production of diffractive structures for optical element generation brought a lot of challenges, and not only the technological ones. The main limit to overcome was the exposition of optical elements of sizes in the order of cm^2 , which are larger than the exposition field of the electron beam writer. However, this work is comprehensive of several different fields.

The main points of this work could be described as the optimization of existing processes to reach the minimal exposition time and the development of new processes (like diffractive structures generated by Fourier transform).

Generators of optimized diffractive structures had a large immediate practical use; thanks to this practical use the generators improved and brought further, new possibilities of applications. Generators could be divided into categories of generators for diffractive grids, generators for preparation of images requested on diffraction and diffractive structures based on Fourier transform, and large diffractive zonal structures.

The specific field described in this text is the calibration of the electron beam writer, which was allowed thanks to the new scanning electron microscope channel including a detector of secondary electrons. The work done was mostly based on analysis of data and preparation of a user friendly calibration environment.

The work succeeded thanks to all the team members in the laboratory of the EBL.

OBSAH

1	Úvod	4
2	Stav řešení	5
3	Cíle disertační práce	11
4	Difrakční mřížky	13
4.1	Základní optické vlastnosti	13
4.2	Technologie	14
4.3	Expoziční data	14
4.4	Algoritmy pro generování mřížek pro souvislé plochy.....	15
4.4.1	<i>Difrakční mřížky pro maticový přístup expozice dat</i>	<i>15</i>
4.4.2	<i>Difrakční mřížky pro obecný přístup expozice dat</i>	<i>19</i>
4.5	Nastavení difrakční účinnosti mřížek	20
4.5.1	<i>Změna hloubky mřížky</i>	<i>20</i>
4.5.2	<i>Změna exponované plochy</i>	<i>21</i>
4.6	Kombinace větších počtů difrakčních mřížek	22
4.6.1	<i>Generátor mřížek pro kombinace jejich větších počtů v jednom místě plochy</i>	<i>23</i>
4.6.2	<i>Generování náhodného rozmístění mřížek.....</i>	<i>24</i>
4.7	Existující algoritmy pro generování difrakčních mřížek	26
5	Počítačem generované hologramy	27
5.1	Zpracování požadovaného obrazu difrakce	27
5.1.1	<i>Úprava obrazu difrakce</i>	<i>28</i>
5.1.2	<i>Optimalizace převodu obrazu difrakce metodou iterativní Fourierovy transformace (IFTA).....</i>	<i>30</i>
5.1.3	<i>Vliv volby velikosti bodu generované struktury.....</i>	<i>30</i>
5.1.4	<i>Převod difraktivní struktury na expoziční data</i>	<i>31</i>
5.1.5	<i>Zpracování víceúrovňových CGH</i>	<i>33</i>
5.2	Difraktivní struktur generovaných využitím Fourierovy transformace pro optické prvky.....	34
5.2.1	<i>Použití iterativní Fourierovy transformace.....</i>	<i>34</i>
5.2.2	<i>Štěrbínová mřížka</i>	<i>35</i>
5.2.3	<i>Efekt kombinace většího počtu difrakčních mřížek realizovaný syntetickým hologramem.....</i>	<i>36</i>
5.3	Využití algoritmů pro převod obrazu na expoziční data litografu pro nedifraktivní struktury.....	38
6	Zonální struktury	39
6.1	Výchozí stav řešení	40
6.2	Vypracované řešení.....	42
6.3	Dosažená zlepšení	44
7	Velkoplošné struktury.....	46
7.1	Kalibrace vychylovacího pole elektronového litografu BS600	46
7.1.1	<i>Matematický model.....</i>	<i>47</i>
7.1.2	<i>Zpracování</i>	<i>47</i>

7.1.3	<i>Funkce pro analýzu obrazu</i>	48
7.1.4	<i>Podpůrné funkce</i>	51
7.1.5	<i>Korekce odečtených odchylek</i>	52
7.1.6	<i>Výsledky kalibrace</i>	52
7.2	Dělení grafického motivu na pole obecného tvaru.....	53
7.3	Význam dělení grafického motivu na pole obecného tvaru.....	56
8	Závěr	58
9	Použitá literatura	60
10	Vlastní práce autora	64

1 Úvod

Text disertační práce pojednává o realizaci optických elementů. Optické elementy jsou prvky ovlivňující elektromagnetické záření, které je lidské oko schopné vnímat, tedy elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek $\langle 400; 750 \rangle$ nm. Popisované optické prvky jsou difrakční struktury pozorovatelné lidským okem; byly proto realizovány na plochách v řádu deseti cm^2 . Rozlišení difrakčních struktur odpovídá poměru velikosti vln elektromagnetického záření a vytvářených čar difrakčních struktur, který je dán sinem požadovaného úhlu difrakce zvolené vlnové délky světla. Difrakce na realizovaných reliéfních difrakčních strukturách ovlivňují pouze fázi dopadajících vln elektromagnetického záření, což umožňuje dosáhnout poměru energie difraktovaného a dopadajícího světla blízkého jedné.

Kapitoly v textu práce jsou po stanovení cílů děleny dle realizovaných optických prvků. Difrakčními optickými prvky v samostatných kapitolách jsou difrakční mřížky, počítačem generované hologramy (CGH) a zonální struktury. Samostatnou kapitolu v textu tvoří problematika realizace velkoplošných difrakčních struktur.

Difrakční mřížky by mohly být považovány za zvláštním případem CGH, kdy je požadován pouze jediný pod difrakce nebo středově souměrná dvojice bodů. Pro generování CGH je používána dvourozměrná Fourierova transformace, z čehož vyplývá, že CGH jsou v Kartézské souřadnicové soustavě periodické. Oproti nim zonální struktury obecně nemusí mít zřejmou periodicitu v Kartézské soustavě.

Předkládaná práce do jisté míry souvisí s předmětem spolupráce mezi Ústavem přístrojové techniky AV ČR a firmou Optaglio s.r.o. (1996-2008). Řadu informací a postupů důvěrného charakteru nebylo možné do práce zahrnout, což je také důvod, proč je text stručnější a méně detailní, než by bylo možné očekávat.

2 Stav řešení

Před začátkem popisu aktuálního stavu řešení uvedeme zkrácený popis technologického postupu vytváření submikronových struktur pomocí elektronové litografie a všeobecné definice užívaných pojmů.

Technologický postup sestává z vytvoření pracovní tenké vrstvy elektronového rezistu na hladké podložce. Podložkou je zpravidla křemíkový substrát tloušťky desetin milimetru. Nejčastěji je pracovní vrstva jediná a je jí elektronový rezist PMMA o tloušťce desetin mikrometru. Vytvoření struktury spočívá v přenesení datových motivů pomocí elektronového svazku do pracovní vrstvy (latentní obraz), vyvolání rezistu, případně následujících technologických operací.

Difrakce je jev charakteristický pro vlnový děj. Setká-li se vlnění s překážkou, dojde na této překážce k jeho ohybu. Vlnění se tak odkloní od přímého směru svého šíření a šíří se i do oblasti tzv. geometrického stínu. Je-li počet překážek, na kterých vlna difraktuje, dvě nebo více, v určitém bodě prostoru potom spolu za určitých podmínek interferují, tzn., že se skládají jejich amplitudy, což může způsobit zesílení, zeslabení nebo úplné vyrušení vlnění v daném bodě prostoru.

Difrakční optické elementy (DOE) zahrnují řadu aplikací, které je možno členit podle význačných rysů na několik základních skupin (přičemž některé aspekty se mohou prolínat): dispersní prvky, zobrazující a fokusační prvky, selektivní filtry, kombinační a dělicí prvky, polarizační prvky, skenovací prvky, prvky pro vlnovodné struktury a integrovanou optiku, a odměřovací mřížky.

Elektronová litografie je technika využívající k bodovému zápisu svazek elektronů. Zápis je případem netermické interakce svazku elektronů s vrstvou vhodné látky nazývané elektronový rezist. Výsledkem interakcí elektronů s polymerním elektronovým rezistem jsou degradační nebo síťovací procesy.

Elektronový litograf vychází z konstrukce rastrovacího elektronového mikroskopu SEM, ale do sestavy je navíc doplněn řídicí systém a stolek pro přesné sesazovací expoziční zařízení. Zdrojem elektronů je wolframová katoda nebo autoemisní katoda. Urychlovací napětí elektronových litografů se pohybují od 200V do 100kV. Elektrony generované katodou mohou být využívány všechny, svazek je pak nazýván

Gaussovským. Nevyužit všech elektronů svazku, zacloněním jeho částí, přináší možnost svazek tvarovat a je pak nazýván tvarovaným.

Elektronový litograf BS600 je litograf s vektorově rozmítaným tvarovaným svazkem proměnné velikosti. Jeho hlavní charakteristiky jsou:

- Čtyřčočková elektronově optická soustava
- Autoemisní katoda
- Formovací systém využívající bodové projekce
- Ultravysokovakuová technika
- Řídící a datový systém

Detailní popis elektronového litografu lze nalézt v literatuře [16] s výjimkou řídicího a datového systému, který byl modernizován v rámci řešení projektu „Úprava elektronového litografu (ELITO)“, viz. [17] [18].

Elektronový svazek lze formovat do tvaru pravidelného čtyřúhelníku, jehož strany mohou nezávisle na sobě nabývat hodnot 0,1 – 6,3 μm . Maximální expoziční plocha je $3,2767 \times 3,2767$ mm, v rámci které je možno vychylovat svazek s krokem 0,1 μm . Expozice struktur větších je zajišťována mechanickým pohybem stolu se substrátem.

Elektronový litograf podporuje i režim rastrovacího elektronového mikroskopu, který byl užit pro kalibraci tvaru expozičního pole litografu.

Softwarovým vybavením řídicího systému je program EXPO firmy ELTEK s.r.o., umožňující simulaci i s krokováním a vlastní realizaci – expozici. Vstupem programu jsou příkazy jazyka ASBEST [16], které jsou průběžně doplňovány a rozšiřovány.

Nejmenší používaná elementární expozice je čtvercová o straně 0,3 μm . Elektrony nevyužité pro elementární expozici jsou tvarovacím systémem odstiňovány ze svazku - menší elementární expozice mají tedy vždy nižší množství energie. Je proto nutno exponovat je déle. Snažíme se tedy, aby elementární expozice měly co největší velikost. Maximální velikost je však také omezena, což vyplývá z nedostatečné homogenity elektronového svazku. Operátor litografu nastavuje tvarovací systém tak, aby nejmenší elementární expozice měla co největší energii. Největší užívané elementární expozice jsou podle stavu litografu 2 až 3 μm .

Maticový přístup expozice dat: vzor souvislé plochy difrakivní struktury musí být velikosti násobku zvolené velikosti bodu grafiky. Hlavní výhodou techniky maticového přístupu expozice dat je nízká zátěž hardware.

Obecný přístup expozice dat: rozměry difrakivních struktur souvislých ploch jsou nezávislé na zvolené velikosti bodu grafiky. Rozhodnutí o nutnosti expozice každé z elementárních expozic je pak nazýváno maskováním.

Rozvoj techniky umožnil vytváření a přenos většího množství dat, čehož bylo využito při návrhu software G-Master (vyvinutý společností ELTEK s.r.o.). Hlavním přínosem zmíněného software bylo umožnění maskování, dále pak optimalizace obecných struktur na Fourierovském principu a možnost generování dat difrakčních mřížek.

Přehled současného stavu - obecně

Pro vytváření základních difrakivních struktur, komplexních elementů či prvků tvořených základními strukturami a pro mikro-optické prvky existuje řada dostupných technik, které jsou postupně rozšiřovány a zdokonalovány. Bez nároku na vyčerpávající přehled můžeme zmínit alespoň následující technologie: mechanické rytí, holografický interferenční záznam [1] [29], litografie laserovým svazkem (bodově orientovaná — *dot by dot*, "pixelově" orientovaná — *dot matrix* [1], obrazově orientovaná — *image matrix* [1] [13] [25]), laserová ablace, elektronová litografie [1] [2] [3] [26] a optická litografie s leptáním iontovým svazkem [1] [27].

Vznik a vývoj **elektronové litografie** [32] [33] [34] [35] [37] v 70. a 80. letech minulého století byl podmíněn zejména požadavkem na vytváření skleněných masek pro jednotlivé výrobní operace při realizaci integrovaných obvodů velmi vysoké integrace. Tato aplikační oblast představuje základ využití elektronových litografií i nadále. Na druhou stranu se v celosvětovém měřítku postupně rozšiřovalo a rozšiřuje využití elektronových litografií do mnoha dalších oblastí, například přímý zápis struktur, vytváření difrakivních prvků [3] [26] a obecně i pro podporu nanotechnologií. Počátky využití elektronové litografie pro difrakivní prvky spadají do přelomu 80. a 90. let minulého století (např. [3]).

Technologie pro vytváření difrakčních struktur spojené s elektronovou litografií můžeme rozdělit na systémy s Gaussovským svazkem [3], systémy s tvarovaným

svazkem [2] a optickou litografií využívající masek připravených elektronovou litografií. **Výhody** spojené s elektronovou litografií spočívají ve značné variabilitě vytvářených struktur, výhodou tvarovaného svazku je nadto potenciál rychlého zápisu struktur. Obecnou **nevýhodou** elektronové litografie je její značná komplikovanost a zejména vysoká pořizovací cena i provozní náklady a s tím související nízká dostupnost této technologie.

Základní kategorie difrakčních struktur a difrakčních optických elementů (DOE) postupně vyvíjených jak ve světě tak v laboratoři elektronové litografie (ÚPT AV ČR) od konce 90. let dosud [38] [40] [42] [43] [49] jsou **difrakční mřížky** [26] [30] [39] [41], **počítačem generované hologramy** (*CGH — Computer Generated Hologram, resp. Fourierovské struktury*) [8] [20] [21] [22] [23] [28] a **zonální struktury** (*Fresnelovské struktury resp., lens-like structures*) [4] [5] [6] [7] [9] [10] [11] [12]. Tyto optické struktury nacházejí uplatnění v různých oblastech zpracování koherentního monochromatického svazku světla i v optice obecně. Významnou oblastí uplatnění kombinace těchto struktur jsou rovněž aplikace bezpečnostního charakteru označované zpravidla jako OVD (*Optically Variable Device*), případně DOVID (*Diffractive Optically Variable Image Device*) [1] [2] [3] [36]. Čeština používá pojmu *ochranné prvky dokumentů a cenin* případně technicky ne zcela přesné *bezpečnostní hologramy*.

Poznámka. Použití elektronové litografie pro vytváření difrakčních prvků dosáhlo v posledních dvaceti letech významného rozšíření, a to zejména pokud se týká systémů s Gaussovským svazkem. Využití tvarovaného elektronového svazku pro tyto aplikace na přelomu tisíciletí bylo v celosvětovém měřítku vcelku ojedinělé a z jistého úhlu pohledu prakticky unikátní. V této souvislosti jsou původní odkazy na literaturu spíše rázu obecně technologického nebo obecně aplikačního. Správnost a významnost zvoleného směru výzkumu a vývoje, kterým se zabývá tato práce a který můžeme v celosvětovém měřítku pokládat za průkopnický, dokládají i odkazy na literaturu z posledních let.

Přehled současného stavu - konkrétně

Následující odstavce shrnují výchozí stav jednotlivých oblastí přípravy difraktivních struktur pomocí technologie elektronové litografie při zápisu tvarovaným svazkem, kterými se tato práce konkrétně zabývá.

1. Difrakční mřížky

Popis pohybu svazku elektronů byl zapisován ručně v jazyku ASBEST. Data popisující jednotlivé difrakční mřížky byla ukládána do samostatných textových souborů, které byly umísťovány do knihovny difrakčních mřížek. Potřebu úpravy obsahu knihovny difrakčních mřížek vyvolaly výsledky diplomové práce M. Halíčka [14]. Cílem jeho práce byla analýza obsahu knihovny a následné vyřazení difrakčních mřížek, jejichž Fourierova transformace simulace difrakční mřížky nedosáhla zvoleného minima difrakční účinnosti.

2. Kombinace většího počtu difrakčních mřížek v jednom místě plochy

Větší počet difrakčních mřížek byl v jednom místě plochy z pravidla aplikován maticovou (čtvercovou) strukturou, což omezuje počet směrů difrakce na mocninu dvou a současně, je-li zdrojem světlo bodové a pozorovaná plocha je větší, může být okem zachytilná pravidelná maticová struktura.

3. Obecné struktury

Obecné struktury zahrnující nejen počítačem generované hologramy ale i grafické motivy byly exponovány bod po bodu o zvolené velikosti. Nejčastěji užívanou velikostí bodu pak byl rozměr $0,5\mu\text{m}\times 0,5\mu\text{m}$. Důvodem pro volbu zmíněné velikosti bodu byla především časová náročnost expozice.

4. Zonální struktury

Zonálními strukturami jsou v práci nazývány difrakční struktury, které nemusí mít zřejmou periodicitu v Kartézské soustavě. Unikátní byly difraktivní struktury generované makry jazyka ASBEST v průběhu expozice, vytvářející tvary kružnic a kruhů. Popis zmíněných maker je uveden v úvodu kapitoly 6.

5. Kalibrace vychylovacího pole elektronového litografu BS600

Kalibrace vychylovacího pole elektronového litografu byla prováděna v krocích:

1. expozice testovacího obrazce pro kalibraci
2. vyvolání
3. měření na optickém mikroskopu
4. ruční nastavení naměřených hodnot

Časová náročnost kalibrace vychylovacího pole litografu byla v řádu desítek minut.

6. Dělení vzoru grafiky

Jak bylo uvedeno, maximální expoziční plocha je $3,2767 \times 3,2767$ mm, avšak realizované optické elementy jsou ve velikosti řádu jednotek cm^2 . Expozice struktur větších než je maximální expoziční plocha je zajišťována mechanickým pohybem stolku se substrátem umístěným ve vakuové pracovní komoře, přesným odměřením souřadnic pomocí laserové interferometrie a elektrickou korekcí přesné polohy stolku. Grafika byla dělena na části velikostí menší expozičního pole, které bylo vždy čtvercové. Pro dělení bylo užíváno nástroje vytvořeného R. Gavendou v rámci jeho bakalářské práce [15]. Výstupem zmíněného nástroje byla sada grafických motivů menších, než je maximální expoziční plocha a soubor popisující vlastní expozici obsahující instrukce pro pojezdy stolu mezi jednotlivými expozičními poli.

3 Cíle disertační práce

Cílem práce bylo zvyšování rozmanitosti požadovaných optických elementů a zvyšování jejich optických vlastností. Současně byl kladen důraz na požadované snižování času expozice. Řešení přinášelo i zvýšení využití technických možností elektronového litografu BS600.

1. Difrakční mřížky

Potřeba návrhu generátoru difrakčních mřížek vznikla s požadavkem na úpravy v existující knihovně difrakčních mřížek a její rozšiřování. Hlavním cílem generátoru difrakčních mřížek bylo umožnění generování požadovaných difrakčních mřížek dle aktuálních technologických požadavků. Technologické požadavky se měnily dle aktuálního průřezu proudové hustoty svazku emitovaných elektronů.

2. Kombinace většího počtu difrakčních mřížek v jednom místě plochy

Potřeba vytvoření generátoru matice náhodného rozložení difrakčních mřížek vznikla s požadavkem na narůstající počet kombinovaných difrakčních mřížek v jednom místě plochy, kdy přestalo být maticové uspořádání postačující. Generátor bylo nutno navrhnout se zaměřením na homogenitu rozložení difrakčních mřížek na ploše a jednotné rozdělení plochy pro jednotlivé mřížky.

3. Obecné struktury

Návrh algoritmů pro převod obecných grafických motivů do jazyka ASBEST popisujícího pohyb svazku elektronů a optimalizace vzniklého kódu. Cílem bylo dosažení plného využití možností elektronového litografu. Aplikací na počítačem generované hologramy vznikly požadavky na návrh rovnic pro převod požadované grafiky na vstupní grafiku pro převod Fourierovou transformací na difraktivní strukturu a následně i realizace převodníků vstupní grafiky na difraktivní strukturu dle postupů popsanych v [20] [21] [22] se zohledněním konkrétních vlastností aparatury BS600.

4. Generování dat pro zonální struktury

Výzkum a vývoj v oblasti generování zonálních difraktivních struktur s cílem odstranit některá omezení makroinstrukcí generujících data během vlastní expozice a dosud používaných pro zonální struktury. Dále rozšíření vyvinutého generátoru o nové

požadované možnosti a to v úzké vazbě na technologické aspekty realizace. Požadována byla implementace algoritmu umožňujícího přípravu dat před expozicí, rozhodnutí o použití elementární expozice na základě porovnání s grafickým motivem, které je dále označováno jako maskování, a úpravu vypočtené pozice polohy elementární expozice, které je dále označováno jako deformace či modifikace výchozího motivu.

5. Kalibrace vychylovacího pole elektronového litografu

Vypracování prostředí pro umožnění opravy zkreslení geometrie vychylovacího pole elektronového litografu využitím *videotras*y signálu sekundárních elektronů (litograf v režimu SEM — rastrovacího elektronového mikroskopu). Prostor pro kalibraci umožňující využití elektronového litografu v režimu SEM mělo za cíl zvýšení rychlosti procesu kalibrace vychylování elektronového litografu.

6. Dělení grafických motivů na části obecných tvarů

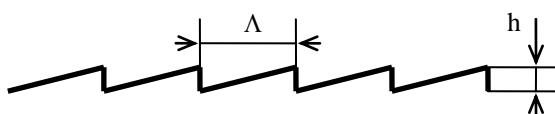
Vypracování algoritmu pro dělení požadované grafiky na expoziční pole obecného tvaru zadaného. Dělení realizované grafiky na expoziční pole obecného tvaru mělo za cíl snížit viditelnost expozičních polí při nízké homogenitě realizované plochy v případě jejího dělení na čtvercová expoziční pole konstantní velikosti.

4 Difrakční mřížky

4.1 Základní optické vlastnosti

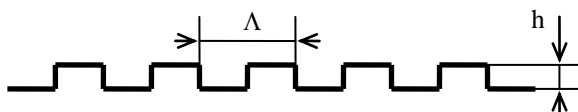
Difrakční mřížky mohou světlo propouštět nebo odrážet. Prochází-li světlo, je měněna jeho amplituda nebo fáze. Při odrazu světla dochází zpravidla pouze ke změně fáze (resp. k její modulaci). Difrakční mřížky realizované v laboratoři EBL jsou fázovými mřížkami určenými nejčastěji k odrazu světla.

Difrakční mřížka je pravidelná reliéfní struktura s danou periodou Λ a hloubkou h .



Obr. 4.1 Difrakční mřížka

Fázové difrakční mřížky realizované v laboratoři EBL jsou nejčastěji realizovány jako binární reliéfy.

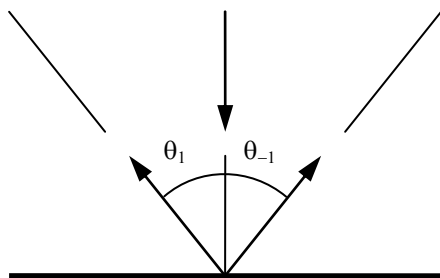


Obr. 4.2 Binární difrakční mřížka

Difrakce je definována jako ohyb vlny na překážce do míst jejího geometrického stínu. Úhel ohybu světla na difrakční mřížce je dán mřížkovou rovnicí (4.1),

$$\sin \theta_q = \sin \theta_i + q \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (4.1)$$

kde θ_i je úhel dopadu světla a θ_q úhel ohybu světla do q -tého difrakčního řádu. Při návrhu difrakčních mřížek je používán model dopadu světla kolmo a vstupem je požadovaný úhel difrakce do prvního difrakčního řádu.



Obr. 4.3 Model používaný při návrhu mřížek

Difrakční obraz je možno určit Fourierovou transformací difrakční struktury, která má periodicitu v kartézské soustavě. Vzdálenost bodu difrakce od nultého difrakčního řádu je dána tangencí úhlu ohybu světla.

Účinnost difrakční struktury je definována jako poměr intenzity světla dopadajícího a světla difraktovaného do zvoleného difrakčního obrazu. Difrakční účinnost binární difrakční struktury je 40%, reliéfní struktury s profilem, který je možno popsat funkcí sinus, 34%.

4.2 Technologie

Popisované mřížky jsou realizovány ve vrstvě elektronového rezistu. Pomocí expozice a následného vyvolání vznikne reliéfní struktura. Realizovaná struktura se liší od ideální binární mřížky zejména v následujících ohledech. Litograf pracuje v rozlišení 100 nm. Reliéf základní čáry otočené mřížky má tedy schodkovitou topologii. Je-li požadováno přiblížení se nebinární difrakční struktury, je reliéf rozdělen na zvolený počet úrovní a výsledný reliéf má schodkový profil. Litograf pracuje s tvarovaným svazkem, danou topologií je tedy nutné vyplnit elementárními obdélníkovými expozicemi s nezávisle nastavitelnou velikostí jednotlivých stran. Velikost elementární expozice je volena s ohledem na minimalizaci celkového času expozice a zachování homogenity plochy elementární expozice. Další příčinou odlišností realizovaných struktur od ideálních je rozptyl elektronů (dopředný rozptyl a rozptyl zpětně odražených elektronů).

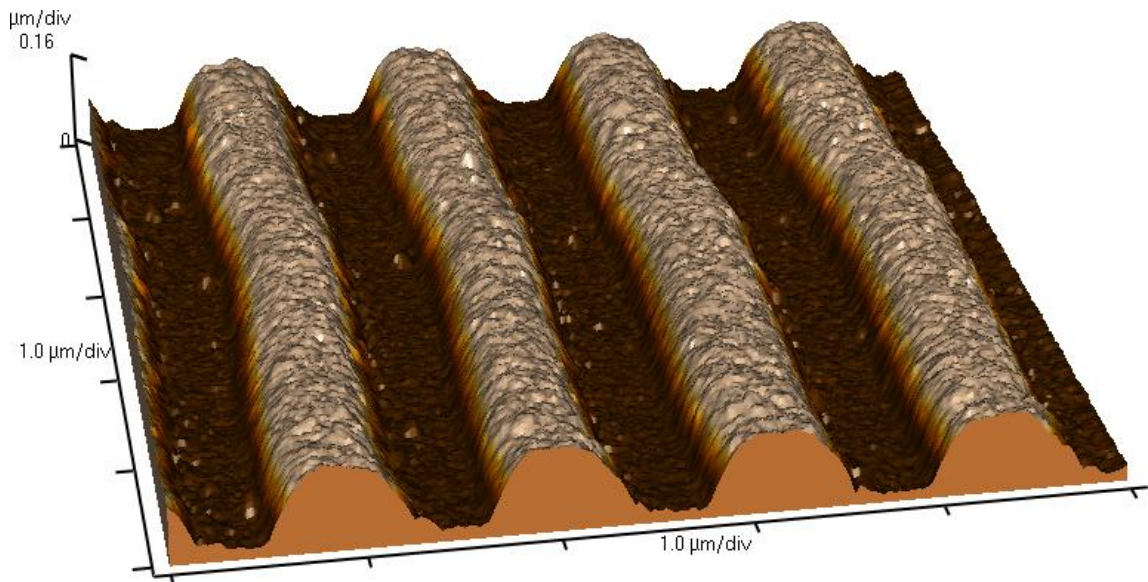
Tloušťka rezistu je pro binární struktury volena zhruba shodná s hloubkou realizované mřížky. Rezisty s tloušťkou přesahující hloubku realizované struktury jsou využívány především při expozici víceúrovňových struktur.

4.3 Expoziční data

Expoziční data pro difrakční mřížky jsou připravována vždy pro malou část plochy a při expozici jsou opakována v kartézské soustavě vždy s konstantním krokem. V maticovém přístupu je zvolenou plochou čtverec dané velikosti strany. V obecném přístupu není tvar plochy předem definován a velikost kroku se v obou osách kartézské soustavy může lišit.

4.4 Algoritmy pro generování mřížek pro souvislé plochy

Důvodem pro algoritmizování generování difrakčních mřížek byla zvýšená potřeba je generovat. Potřebu způsobila změna volby parametrů mřížek po analýze exponovaných mřížek generovaných podle analýzy expozičních dat provedené v [14], která ukázala, že nejvyšší účinnosti dosahují binární mřížky s poměrem ploch exponované a neexponované 1:1. Analýza však uvažovala ideální technologické podmínky, kdy by exponovaná plocha byla také v požadované hloubce vyvolána. Další výzkum ukázal potřebu kompenzovat rozptyl elektronů mimo směr dopadu svazku elektronů. Elektrony pohybující se mimo směr dopadu svazku způsobují změnu profilu reliéfu, kterou pro případ binární mřížky ukazuje obr. 4.4.



Obr. 4.4 Profil mřížky změřený mikroskopem atomárních sil

4.4.1 Difrakční mřížky pro maticový přístup expoziční dat

Data pro elektronový litograf byla v minulosti vytvářena operátorem. Vytvoření kódu v jazyku ASBEST popisujícího mřížku bylo časově náročné a pro přehlednost kódu byl užíván vyšší počet instrukcí. Cílem úkolu bylo navržení algoritmu pro vytváření mřížek zvolených parametrů omezených čtvercem o zvolené velikosti při současném dosažení co nejvyšší difrakční účinnosti a zachování co nejnižší expoziční náročnosti dané počtem instrukcí.

Vytváření dat pro řízení svazku elektronového litografu popisujících strukturu difrakčních mřížek bylo algoritmováno. Výstupem algoritmu je kód v jazyku ASBEST. Vstupními parametry algoritmu jsou:

1. velikost mřížky v rozlišení litografu [0,1 μm],
2. poloha bodu v obrazu difrakce vztažená k nultému difrakčnímu řádu [-]
3. zmenšení šířky čáry [0,1 μm],
4. minimální velikost elementární expozice [-] a
5. maximální velikost elementární expozice [-].

Parametr poloha bodu v obrazu difrakce byl zvolen pro zajištění návaznosti jednotlivých čar mřížky. Hodnoty parametru jsou celá čísla. Návaznost čar mřížky vychází z vlastností Fourierovy transformace.

Parametr zmenšení šířky čáry slouží ke snížení změn profilu způsobených rozptylem elektronů mimo směr dopadu svazku. Tento parametr je zadáván dle aktuálních technologických podmínek litografu a byl zpravidla pro všechny mřížky v expozici shodný.

Důvodem pro specifikaci minimální velikosti elementární expozice je významná závislost expoziční časové náročnosti na zvolené minimální velikosti elementární expozice (*razítka*). Minimální užívaná velikost elementární expozice je 0,3×0,3 μm. Důvodem pro zvýšení velikosti elementární expozice by bylo snížení časové náročnosti, zvyšování minimální velikosti elementární expozice však snižuje dosahovanou difrakční účinnost generované difraktivní struktury.

Implementaci 3. a 4. parametru umožnilo pojetí algoritmu odvozené z rovnice přímky (4.2).

$$y = k \cdot x + q \quad (4.2)$$

Hodnota k je dána podílem hodnot polohy bodu v obrazu difrakce $[X; Y]$.

$$k = X/Y \quad (4.3)$$

Posuv přímky q se liší pro každou úsečku mřížky s posuvem daným podílem velikosti strany mřížky S_y , realizovaném rozlišení r a počtem průniků vertikální stranou, který je dán hodnotou Y polohy bodu v obrazu difrakce. Celé číslo n označuje úsečku.

$$q = \frac{n \cdot S_y}{Y \cdot r} \quad (4.4)$$

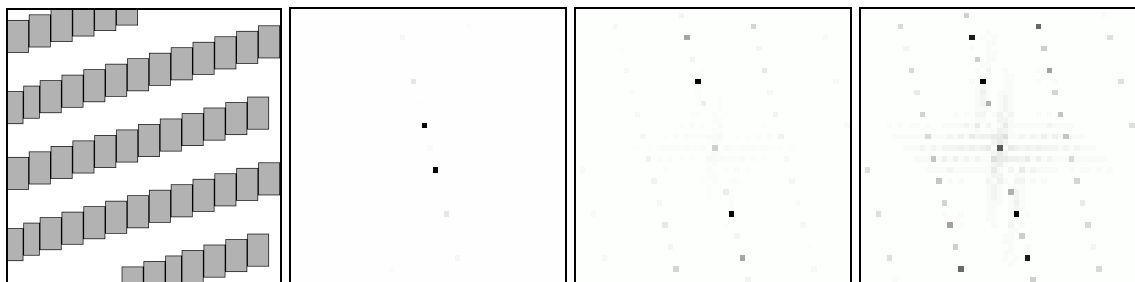
Pro přiblížení uvedeme jako příklad čtvercovou mřížku velikosti $S_x=S_y=5\mu\text{m}$. Požadovaný úhel difrakce $\theta_l=30^\circ$ pro vlnovou délku $\lambda=600\text{nm}$ a úhel otočení mřížky $\alpha=15^\circ$. Uvažujeme dopad záření kolmo. Požadovaná perioda mřížky je dle mřížkové rovnice $\Lambda=1,2\mu\text{m}$. Body v obrazu difrakce jsou dány vztahy (4.5) $X=4$, $Y=1$.

$$X = \frac{S_x}{\Lambda} \cdot \cos(\alpha), \quad Y = \frac{S_y}{\Lambda} \cdot \sin(\alpha) \quad (4.5)$$

Hodnoty polohy bodu v obrazu difrakce musí být celočíselné. Realizovaný úhel otočení se následkem zaokrouhlení od požadovaného může lišit. V uvedeném případě je realizovaný úhel otočení $\alpha=14^\circ$.

Simulace výstupu zvoleného řešení generátoru mřížek je uveden na obr. 4.5 společně s jejím difraktivním obrazem. Difraktivní obraz je zobrazen ve třech úpravách. První zobrazuje intenzity všech difrakčních řádů, druhý je po odstranění obou prvních řádů a třetí je úpravou druhého posílením šedí v bitmapě pro zvýraznění poloh parazitních bodů difrakce. Rekonstrukce obrazu difrakce je uvedena pro možnost porovnání s později uvedeným řešením pomocí Fourierovy transformace.

Difrakční mřížka má při exponované ploše 45,88% difrakční účinnost 37,56%, přičemž do nultého řádu je podle výpočtu odraženo pouze 0,68% z množství dopadajícího záření.

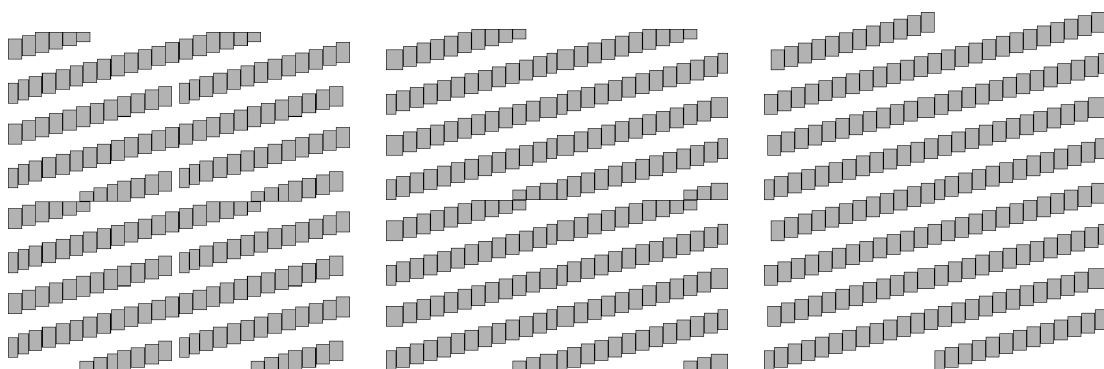


Obr. 4.5 Vygenerovaná mřížka a rekonstrukce obrazu difrakce

Elementární expozice o straně menší než zvolené minimum jsou z popisu mřížky na obr. 4.5 vyřazeny. Vyřazování menších expozic je vhodné při kombinaci většího počtu mřížek v jednom místě plochy, pro použití na souvislých plochách však dochází k přerušení čar, jak je vidět na obr. 4.6 vlevo. Algoritmus byl proto dále rozšiřován.

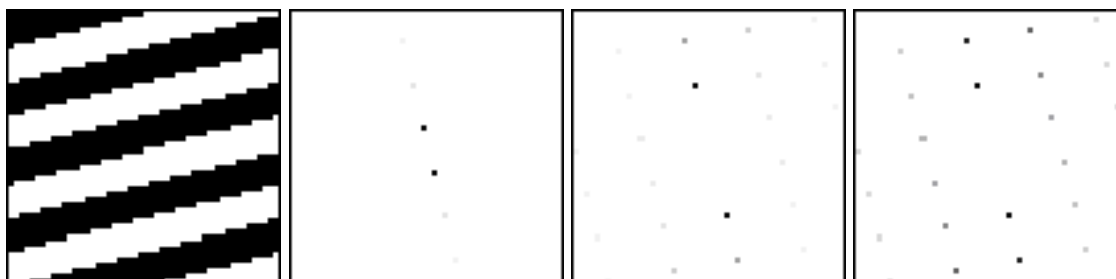
Algoritmus byl upraven tak, aby vznikající mezery byly vyplňovány posledními elementárními expozicemi před mezerami (viz obr. 4.6 uprostřed). Vyplnění mezer snížilo počet přerušení čar difrakčních mřížek a data generovaná tímto algoritmem jsou stále vhodná pro expozici sousedních motivů různých parametrů.

Pro souvislé plochy vyplněné jedinou mřížkou byl algoritmus upraven tak, aby elementární expozice na okraji přesahovaly rozměry mřížky, ale vzájemně se nepřekrývaly. Vygenerovaná mřížka se proto při použití zdá být bez jakéhokoli přerušení, jak je vidět na obr. 4.6 vpravo.



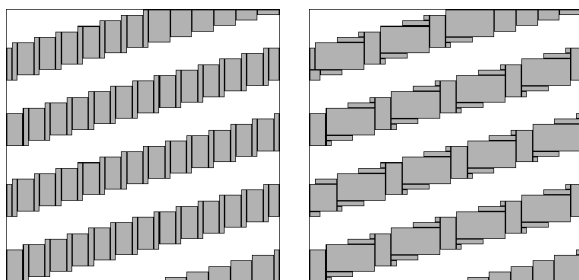
Obr. 4.6 Simulace výstupů algoritmů pro generování mřížek pro maticový přístup

Naskytá se otázka, proč nebylo řešení algoritmu založeno na Fourierově transformaci, která by zaručila vždy ideální řešení problému z hlediska kontroly vyhodnocením pomocí Fourierovy transformace. Důvod si ukážeme na příkladu binární mřížky o velikosti $5 \times 5 \mu\text{m}$ a požadovaném bodu v obrazu difrakce na pozici $[4; 1]$, jehož Fourierova transformace je na obr. 4.7. Účinnost požadovaného difrakčního řádu je 40,58%. Poměr počtu bodů exponovaných a neexponovaných je v uvedeném příkladu právě 1:1; intenzita nultého difrakčního řádu je proto 0.



Obr. 4.7 Difrakční mřížka získaná Fourierovou transformací difrakčního obrazu a zpětná rekonstrukce obrazu

Byl vyzkoušen i převod Fourierovy transformace požadovaného obrazu difrakce na expoziční data. Algoritmy použité pro převod vygenerované struktury na expoziční data byly navrženy a implementovány pro převod obecných difraktivních struktur a jsou založeny na myšlenkách: na obr. 4.8 vlevo nalézání souvislých čar a jejich dělení na oblasti o stejné výšce a poloze; a na obr. 4.8 vpravo postupné vyhledávání obdélníkových oblastí o maximální ploše. Počet elementárních expozičních je v obou případech 102.



Obr. 4.8 Mřížka z obr. 4.5 převedená na expoziční data 1:1

Ve srovnání se zvolenou metodou generování mřížek došlo ke zvýšení počtu elementárních expozičních na dvojnásobek při zvýšení vypočtené difrakční účinnosti o 3 procentní body.

Zvolené řešení generování mřížek využitím rovnice přímky tedy umožňuje zohlednění technologického stavu litografu při nízkém počtu generovaných elementárních expozičních za cenu přijatelného snížení difrakční účinnosti.

4.4.2 Difrakční mřížky pro obecný přístup expozičních dat

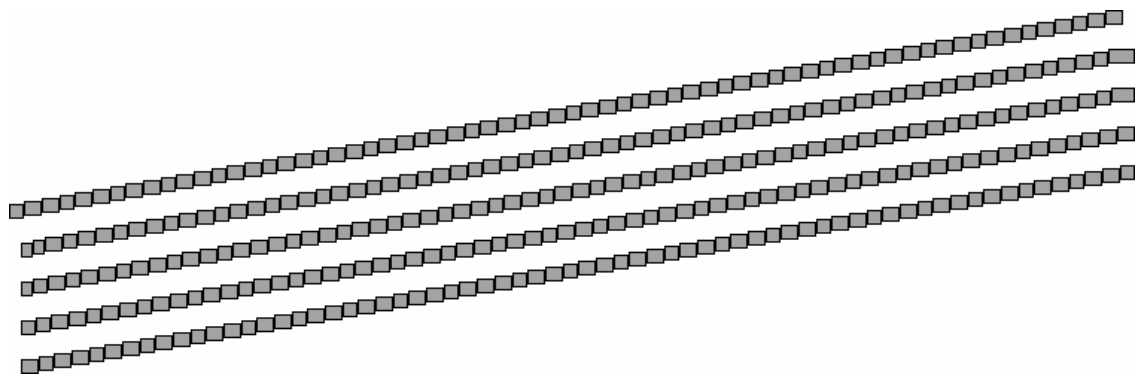
Nástroje pro vyplňování grafického motivu (software G-Master) dodané pro generování dat pro obecný přístup expozičních je možno přímo zadat periodu a úhel otočení difrakční mřížky oproti horizontální rovině. Algoritmus pro generování mřížek však vygeneruje nejkratší možnou čáru pod zvoleným úhlem a tu pak, s konstantním celočíselným krokem v jednotkách rozlišení litografu, kopíruje. Je možno předpokládat, že důvodem pro volbu tohoto přístupu implementace algoritmu byla minimalizace nároků na hardware při vyplňování. Nevýhodou tohoto přístupu je omezení na mřížky s periodou vynásobenou kosinem úhlu otočení mřížky v jednotkách rozlišení litografu.

Požadavkem na dodržení zadaných vlastností mřížky vznikla potřeba vytvoření nástroje pro generování mřížek zvolených parametrů.

Řešení bylo získáno úpravou algoritmu představeného v kapitole 4.4.1. Vstupní parametry velikost mřížky a poloha bodu v obrazu difrakce byly nahrazeny parametry perioda mřížky Λ a úhel jejího otočení α . Úprava spočívala především v odvození velikosti stran opakovaného motivu. Odvození vychází z pravidel:

- a) poměr stran musí odpovídat tangenti úhlu otočení mřížky α ,
- b) velikost kratší strany opakované struktury musí být celočíselným násobkem požadované periody mřížky Λ vynásobené kosinem úhlu otočení mřížky α .

Příklad výstupu funkce převedeného na obraz je na obr. 4.9.



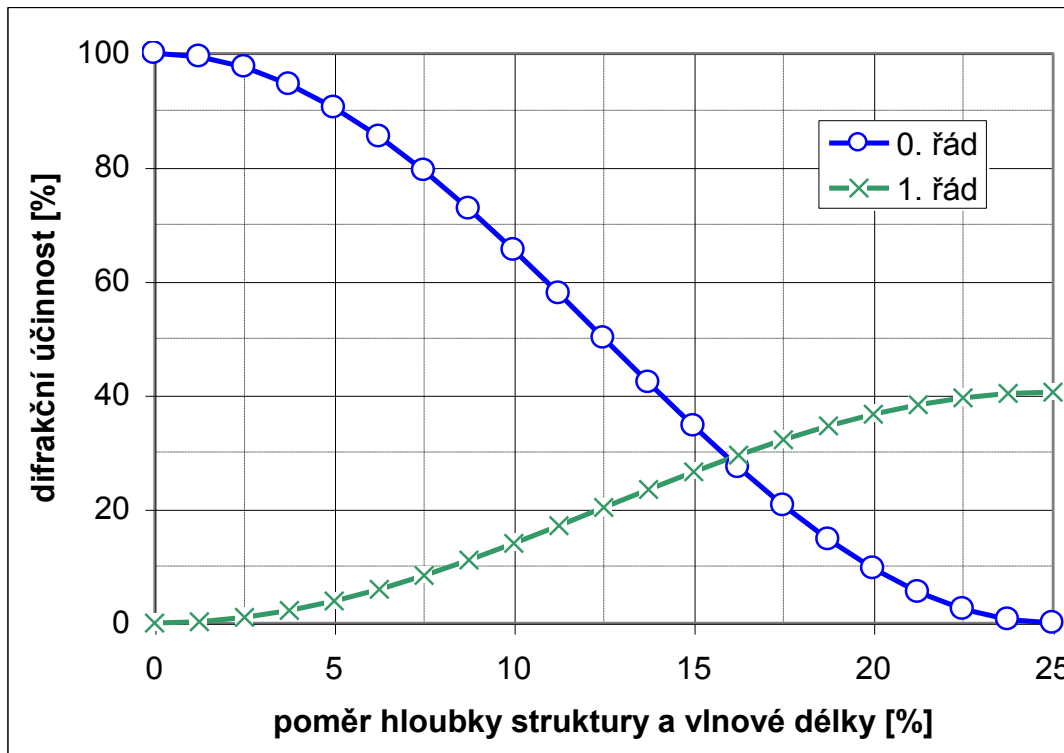
Obr. 4.9 Simulace dat difrakční mřížky zvolených difrakčních parametrů

4.5 Nastavení difrakční účinnosti mřížek

Nastavení difrakční účinnosti mřížek je požadováno návrháři hologramů při používání 3D motivů. Dosažení snížení difrakční účinnosti změnou hloubky reliéfu nebylo z důvodů uvedených níže prakticky využito. Představovaná změna exponované plochy vychází z myšlenky nechat světlo pro dosažení snížení difrakční účinnosti, o které je difrakční účinnost mřížky snížena, odrazit do nultého řádu difrakce a je pro své výhody prakticky používána.

4.5.1 Změna hloubky mřížky

Vliv hloubky reliéfu na účinnost difrakce je možné analyzovat pomocí vlnových rovnic popisujících šíření světla. Pro obdélníkový reliéf očekáváme průběh obdobný čtverci funkce sinus. Výsledek analýzy (graf na obr. 4.10) ukazuje tuto závislost (maximální účinnost je při naladění hloubky na $\lambda / 4$). Poznamenejme, že pro jiný reliéf struktury bude tato závislost odlišná. Pro struktury s krátkou periodou a velkou hloubkou reliéfu se začne uplatňovat vliv polarizace dopadajícího světla.

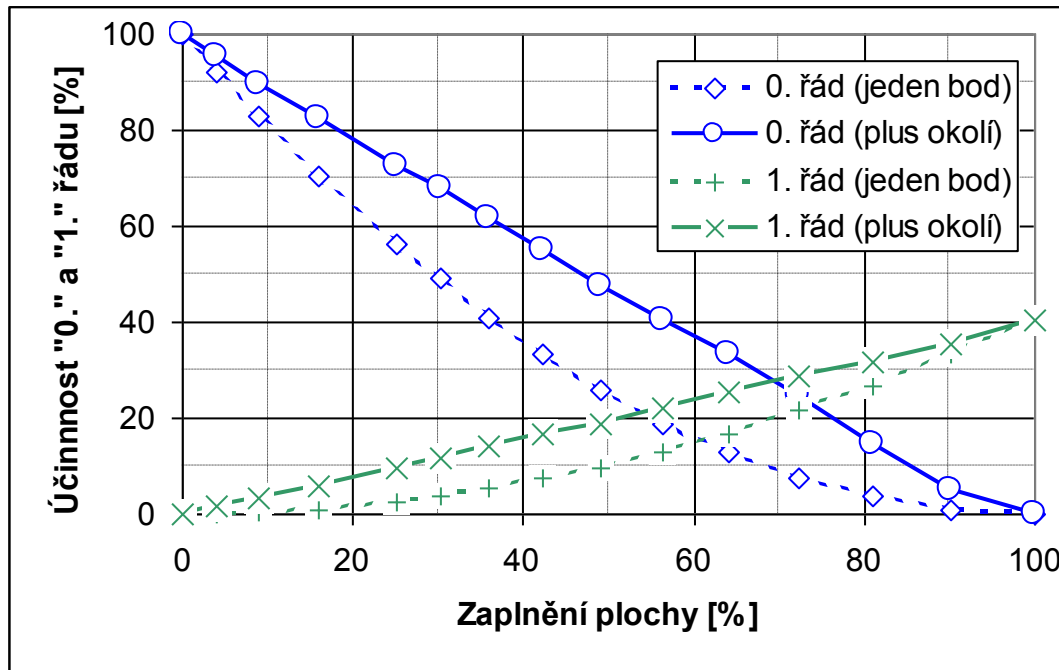


Obr. 4.10 Závislost difrakční účinnosti na hloubce mřížky s obdélníkovým profilem

Binární litografická technologie neumožňuje nastavit proměnnou hloubku struktur v rámci jedné expozice. Pomocí reliéfní litografie by bylo možné připravit struktury, které by lokálně měly různou hloubku, ale tento přístup má jistá úskalí. Přesné nastavení hloubky reliéfu je technologicky obtížné. Závislost účinnosti na hloubce reliéfu není lineární, v oblasti malých a velkých intenzit je křivka velmi plochá. Z hlediska expoziční náročnosti je tento přístup rovněž nevýhodný, i když se vlivem menší expoziční dávky zkrátí čas potřebný na jednu elementární expozici, režijní čas pro přenos dat a nastavení pozice svazku se nezmění.

4.5.2 Změna exponované plochy

Pokusíme se o analýzu strukturálních přístupů na příkladu bodové grafiky. Při vyplnění zvolené grafické oblasti bodem, který je tvořen celoplošnou mřížkovou strukturou, je účinnost prvního difrakčního řádu asi 40.5%. Budeme-li nyní snižovat plochu bodu, kterou je mřížka vyplněna, dojde ke snižování intenzity prvního řádu a zvyšování intenzity odrazu (0. řádu). Dále dojde k rozostření svazku kolem hlavního difrakčního směru. Situaci ukazuje graf na obr. 4.11, kde je vynesena závislost účinnosti mřížky v jednotlivých směrech (nulový a první řád) v závislosti na zaplnění plochy bodu.



Obr. 4.11 Difrakční účinnost mřížky v závislosti na zaplnění plochy

Zatímco ve směru difrakčního maxima je závislost výrazně podlineární, při uvažování součtu intenzit v jistém okolí maxima je závislost prakticky lineární, což odpovídá intuitivnímu předpokladu. Analýza byla provedena pro čtvercový pixel velikosti $10\ \mu\text{m}$ vyplněný mřížkou s periodou $1\ \mu\text{m}$; velikost okna (okolí daného řádu) v obrazu difrakce byla zvolena 9×9 bodů; způsob uzavírání štěrbiny byl čtvercový. Z praktického hlediska je tento přístup výhodný, neboť částečně vyplněnou plochu lze poměrně snadno a přesně definovat. Výhodou je rovněž snížení expoziční náročnosti.

Předpokládaný vztah exponované plochy a intenzity difraktovaného světla byl prakticky ověřen testem zahrnujícím všechny možnosti pro zvolené rozlišení a velikost matice bodů. Vyhodnocení popsaného testu potvrdilo předpokládanou lineární závislost intenzity difraktovaného světla do požadovaného směru na zaplnění exponované plochy. Realizovaným řešením byla proto úprava algoritmu pro generování difrakčních mřížek pro maticový přístup expozice dat. Úprava spočívala v zastavení generování mřížky po dosažení zaplnění požadované plochy.

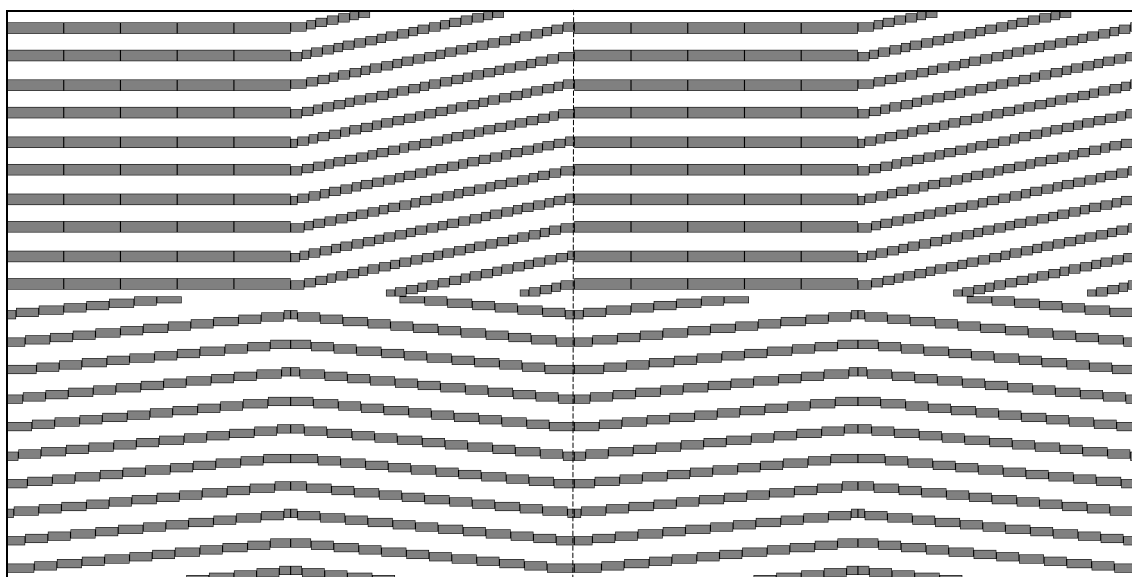
4.6 Kombinace větších počtů difrakčních mřížek

Větší počet difrakčních mřížek v jednom místě plochy byl dříve aplikován maticovou strukturou. Maticové struktury byly voleny nejčastěji čtvercové, což

omezovalo počet použitých difrakčních mřížek na druhou mocninu strany jejich velikosti. Zvyšující se požadavky na počet úhlů otočení difrakčních mřížek a kombinace rozvoju s různými periodami vyvolaly nejprve potřebu generovat difrakční mřížky bez omezení daných volbou úhlu difrakce polohou bodu v obrazu difrakce a následně i návrh generátoru náhodného rozmístění mřížek.

4.6.1 Generátor mřížek pro kombinace jejich větších počtů v jednom místě plochy

Kombinovány jsou zpravidla čtvercově ohraničené difrakční mřížky. Ideální pro kombinaci většího počtu difrakčních mřížek v jednom místě plochy proto jsou mřížky generované pro maticový přístup expozice. Vhodné budou především pro možnost dodržení návazností čar. Ukázka umístění čtyř difrakčních mřížek maticovým přístupem jednotné velikosti $12,5\mu\text{m}\times 12,5\mu\text{m}$ a periody $1,25\mu\text{m}$ generovaných generátorem pro maticový přístup expozice (dvě stejné čtveřice mřížek umístěné vedle sebe) je na obr. 4.12.

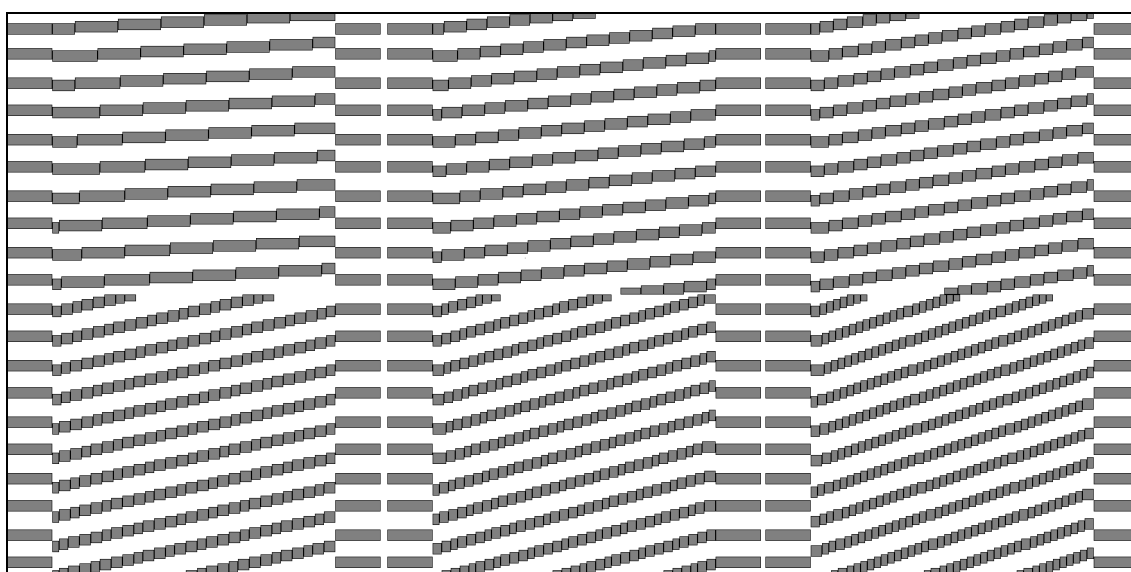


Obr. 4.12 Návaznost mřížek generovaných pro maticový přístup expozice dat.

Nevýhodou mřížek vytvořených generátorem pro maticový přístup expozice je při kombinaci rozvoju s více periodami difrakční mřížky v jednom místě plochy odchylka úhlů otočení jednotlivých period.

Pro dodržení úhlů byl nejdříve používán obecný přístup expozice. Elementární expozice přesahující čtvercové ohraničení však byla algoritmem pro kontrolu přesahu vyloučena a vznikaly mezery, které snižovaly dosaženou difrakční účinnost.

Algoritmus pro obecný přístup expozice byl proto upraven tak, aby generoval pouze čtvercově ohraničené difrakční mřížky. Jeho použitím však ztratíme výhody návaznosti čar mřížek, jak ukazuje obr. 4.13, čímž se sníží difrakční účinnost. Mezi jednotlivé difrakční mřížky jsou na obr. 4.13 vloženy referenční elementární expozice. Vyhodnocení snížení intenzity bylo možné jen subjektivním dojmem pozorovatele, protože Fourierova transformace není k tomuto vyhodnocení vhodná.



Obr. 4.13 Návaznost rozvoje mřížek s periodou $1,25\mu\text{m}$ a krokem 3°

Návaznost je požadována především při expozici rozvoju difrakčních mřížek s jedinou periodou. Při kombinaci rozvoju difrakčních mřížek s různými periodami v jednom místě plochy by již vzájemná návaznost difrakčních mřížek nebyla možná ani při použití difrakčních mřížek generovaných pro maticový přístup expozice.

4.6.2 Generování náhodného rozmístění mřížek

Se vzrůstajícími nároky na počet různých difrakčních mřížek kombinovaných v jednom místě plochy, které vznikaly především z důvodu potřeby odstranění rušivého dojmu vznikajícího při zachycení mezery mezi jednotlivými úhly pozorování, vzrůstal požadavek na odstranění omezení při volbě počtu obrazů. Počet obrazů je dán umístováním do čtvercových matic. S velikostí strany čtverce matice vzrůstá pravděpodobnost pozorování rastru okem.

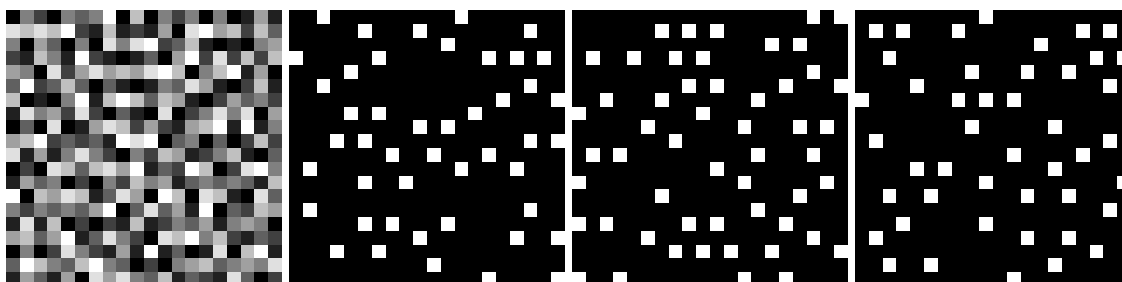
Navrženým řešením bylo vytvoření matice náhodných čísel s těmito požadavky:

1. stejné zastoupením bodů jednotlivých obrazů na ploše a
2. maximální homogenita každého jednotlivého obrazu.

Bylo vyzkoušeno několik přístupů k řešení, které se zabývaly přímo generováním matice náhodných čísel. Pro praktické užití byl zvolen přístup optimalizace matice náhodných čísel vygenerované algoritmem využívajícím Gaussovy normální distribuce. Hlavním důvodem pro volbu tohoto řešení byla nižší časová náročnost zpracování.

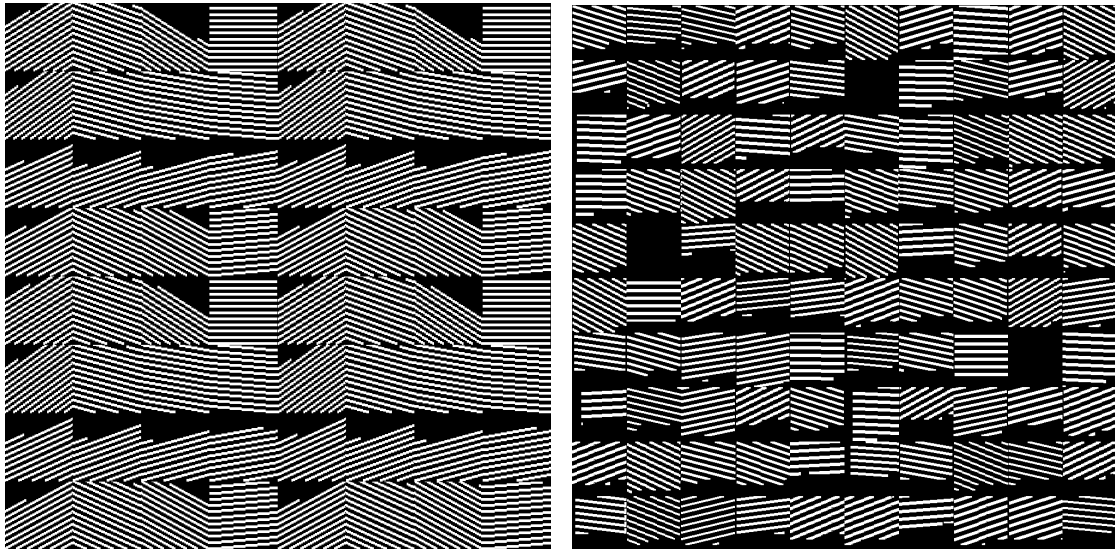
Generování náhodných čísel je v matematice řešeným problémem. Předností užití dostupných algoritmů založených na Gaussově normální distribuci a Wignerově půlkruhové distribuci je rychlost dostupných generátorů náhodných čísel. Nevýhodou je především nevyhovující homogenita zastoupení jednotlivých obrazů na ploše. Rozdíly v zastoupení bodů jednotlivých mřížek v matici byly shledány jako přijatelné.

Zvoleným řešením bylo sestavení algoritmu kontrolujícího vygenerovanou matici o zvoleném počtu hodnot náhodných čísel. Podmínkou dostatečnosti homogenity matice byl zvolen výskyt jediného bodu právě kontrolované hodnoty v poli o velikosti odpovídající počtu hodnot náhodných čísel. Pokud se v kontrolovaném poli vyskytuje více bodů stejné hodnoty, jsou hodnoty bodů pozměněny tak, aby byla snížena odchylka zastoupení bodů v matici. Časová náročnost kontroly roste exponenciálně s velikostí matice; proto je vygenerována a kontrolována matice odpovídající svou velikostí výkonu počítače, na kterém je zpracována.



Obr. 4.14 Matice devíti náhodně rozmístěných mřížek a tři z masek

Vygenerovaná matice náhodných čísel, jejíž příklad je na obr. 4.14, je sadou binárních masek, jejichž vynásobením požadovanými obrazy pro jednotlivé pohledy a následným sečtením dostáváme vstupní data.



Obr. 4.15 Porovnání maticového a náhodného rozmístění mřížek

Dojem maticového umístění difrakčních mřížek s nastavovanou difrakční účinností s dosaženým dojmem jejich náhodným umístěním je možné porovnat na obr. 4.15., ze kterého je patrná snadná rozeznatelnost maticové struktury v levé části a praktická nemožnost v simulaci zobrazené v pravé části.

4.7 Existující algoritmy pro generování difrakčních mřížek

Algoritmy pro generování difrakčních mřížek jsou založeny na myšlence výpočtu jednotlivých čar difrakční mřížky využitím rovnice přímky a úpravy získaných hodnot podle aktuálních technologických omezení elementární expozice.

Generátory difrakčních mřížek byly vypracovány pro:

- maticový přístup expozice dat se zadáváním polohy bodu difrakce
- obecný přístup expozice dat zadáváním periody mřížky a úhlu difrakce
- kombinace větších počtů difrakčních mřížek v jednom místě plochy
- nastavování difrakční účinnosti mřížek se zadáváním periody a úhlu difrakce

Algoritmus pro generování a kontrolu vlastností dvourozměrných polí náhodných čísel byl specifickým řešením úkolem. Popis řešení byl zařazen do této kapitoly, protože řešení bylo požadováno pro vytváření masek motivů skládajících se z difrakčních mřížek.

5 Počítačem generované hologramy

Fourierova transformace umožňuje návrh počítačem generovaných hologramů - reliéfu difraktujícího světlo do více než jednoho bodu. Podmínkou jejího užití je Fraunhoferův popis šíření světla po odrazu nebo průchodu světla, který předpokládá pozorovatele nekonečně daleko od reliéfu. Pro rekonstrukci obrazu by bylo ideální užití vlny monochromatického světla stejné homogenity v celém průřezu svazku o ploše větší než navrhovaný reliéf.

Počítačem generované hologramy (CGH) exponované v laboratoři EBL jsou fázovými hologramy. Odrazem vlny v různých místech reliéfu dochází k fázovým posuvům a následně interferenci. Reliéf tedy nezmění amplitudu vlny.

Hledaným výstupem výpočtu je reliéf, vstupem je požadovaný obraz, oba jsou zastoupeny maticí komplexních čísel stejných rozměrů. Jak bylo uvedeno, amplitudy komplexních čísel na straně reliéfu nejsou realizovány. Bylo by proto optimální aby jejich velikost byla na celé ploše konstantní. Popsanému optimálnímu stavu je možné se přiblížit vhodnou volbou fáze komplexních čísel na straně požadovaného obrazu.

Počítačem generované hologramy (resp. difraktivní struktury se skrytým obrazem) byly navrhovány využitím programu, který hodnoty fáze komplexních čísel na straně požadovaného obrazu neoptimalizuje. Vznikla proto potřeba realizace algoritmu pro optimalizaci fáze komplexních čísel zastupujících vstupní grafiku.

Výstupní data popisující reliéf jsou uložena v grafickém formátu. Grafické soubory byly dříve exponovány po jednotlivých bodech elementárními expozicemi se zvolenou konstantní velikostí (nejčastěji $0,5 \times 0,5 \mu\text{m}$). Počet elementárních expozic odpovídá jedné polovině bodů na ploše. Časová náročnost expozice počítačem generovaných hologramů byla proto vysoká.

5.1 Zpracování požadovaného obrazu difrakce

Potřeba dosažení lepší kvality obrazu difrakce byla vyvolána požadavkem na umístění obrazu difrakce dál od nultého difrakčního řádu než bylo obvyklé pro dříve realizované počítačem generované hologramy a snížení odchylky rekonstruovaného obrazu od požadovaného.

Prvním krokem zpracování obrazu difrakce je jeho příprava, která spočívá v odstranění geometrických odchylek vznikajících při promítnutí na ploché stínítko. Následuje převod požadovaného difrakčního obrazu na grafická data popisující reliéf využitím postupu iterativní Fourierovy transformace (IFTA). Posledním krokem přípravy expozice je převod grafických dat na optimalizovaná data pro elektronový litograf v jazyku ASBEST, které umožnilo přípravu a expozici dat v rozlišení daném technickými možnostmi litografu při současném snížení celkové časové náročnosti expozice.

5.1.1 Úprava obrazu difrakce

Požadovaný obraz je nutno upravit z hlediska geometrického zkreslení při zobrazení na plochem stínítku. Uvažován je dopad svazku monochromatického světla na reliéf kolmo. Geometrické zkreslení ovlivní polohu bodů a plochu, na které bude rozložena intenzita dopadajícího záření.

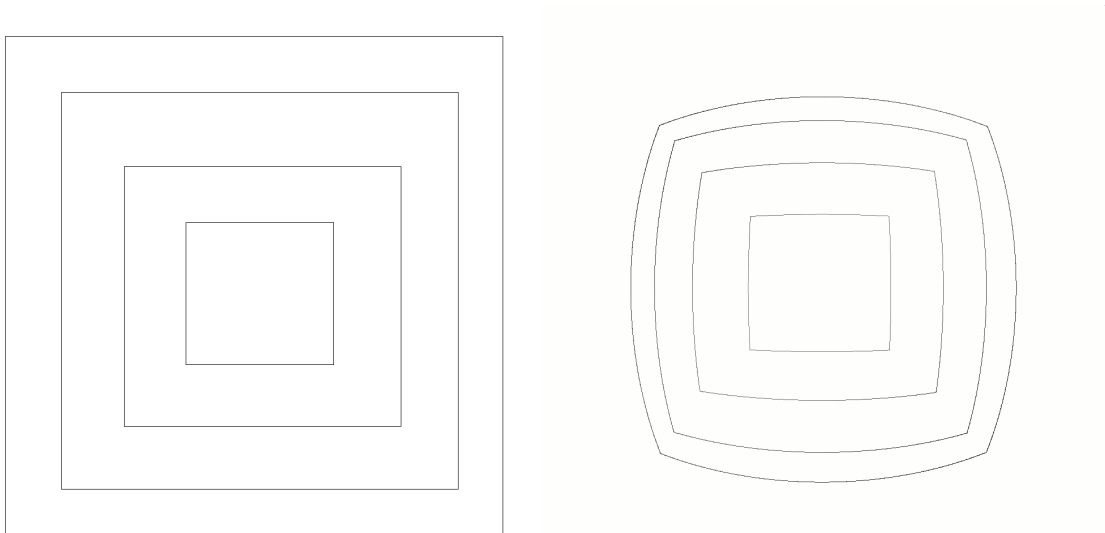
Požadovanou polohu bodu na stínítku $[x; y]$ ovlivní vzdálenost reliéfu od stínítka v , velikost stran generované difraktivní struktury S_x , S_y a vlnová délka monochromatického světla λ použitého k rekonstrukci obrazu. Polohu bodů $[X; Y]$ v převáděném obrazu je možno určit vztahem (5.1); je vztažena k nultému řádu difrakce a je bezrozměrná. Velikost strany výstupní grafiky je dána podílem strany generované struktury a velikostí bodu výstupní grafiky.

$$X = \frac{x \cdot S_x}{\lambda \cdot \sqrt{v^2 + x^2 + y^2}}; Y = \frac{y \cdot S_y}{\lambda \cdot \sqrt{v^2 + x^2 + y^2}}, \quad (5.1)$$

Vzdálenost bodů se zvyšuje se zvyšující se vzdáleností od nultého difrakčního řádu, intenzita bodů dopadajícího záření se rozloží na různě velké ploše. Množství požadované intenzity je proto nutno upravit v závislosti na velikosti plochy, na kterou dopadla. Vzdálenost bodů je dána polohou okolních bodů, kterou určíme vztahem (5.2).

$$x = \frac{X \cdot v}{\sqrt{S_x^2 / \lambda^2 + X^2 + Y^2}}; y = \frac{Y \cdot v}{\sqrt{S_y^2 / \lambda^2 + X^2 + Y^2}}. \quad (5.2)$$

Vztahy (5.1) a (5.2) byly odvozeny z mřížkové rovnice a základních vlastností Fourierovy transformace. Vztahy byly použity i pro vygenerování korekce zkreslení ukázkových motivů difrakčního obrazu na obr. 5.1. a obr. 5.2.

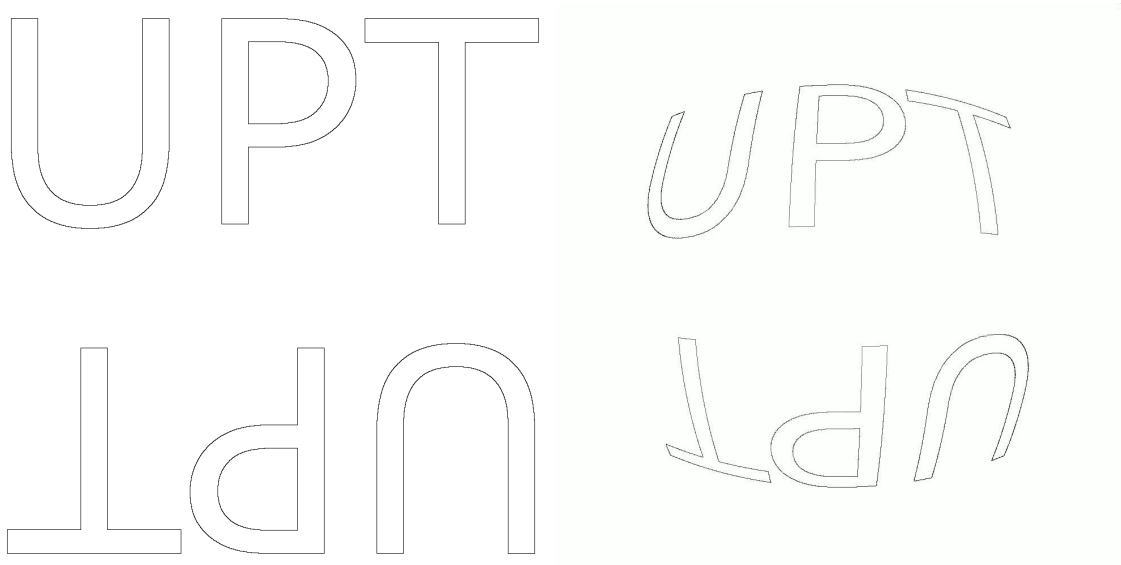


Obr. 5.1 Úprava vzorového obrazu pro převod

Parametry zvolené pro převod byly: vlnová délka světla pro čtení obrazu $\lambda=550\text{nm}$, vzdálenost stínítka $v=55\text{mm}$, velikost generované difrakční struktury $S=100\mu\text{m}$ a velikost bodu generované struktury $0,3\mu\text{m}$.

Z obr. 5.1 je patrné, že při malém úhlu difrakce dochází k zanedbatelným zkreslením. Bez úprav obrazu difrakce byl návrh motivů malých velikostí a jejich umísťování jen do oblastí blízko středu jediným vhodným řešením.

Praktický příklad použití je uveden na obr. 5.2. Parametry uvedené pro příklad zobrazený na obr. 5.1 byly zachovány.



Obr. 5.2 Úprava požadovaného obrazu pro převod

5.1.2 Optimalizace převodu obrazu difrakce metodou iterativní Fourierovy transformace (IFTA)

Dosažení vysoké difrakční účinnosti i homogenity difraktovaného obrazu je možné vhodnou volbou fáze bodů požadovaného obrazu difrakce. Uspokojivých výsledků bylo dosaženo optimalizační metodou IFTA, která je realizována v krocích:

1. požadovaný obraz je upraven nastavením náhodných hodnot fáze,
2. požadovaný obraz je převeden inverzní Fourierovou transformací na reliéf,
3. reliéf je převeden na fázový (moduly bodů jsou normalizovány na 1),
4. je provedena simulace difrakce převodem Fourierovou transformací,
5. je vyhodnocena odchylka modulů simulovaného obrazu od požadovaného, je-li menší než zvolené maximum, algoritmus je ukončen,
6. fáze bodů simulovaného obrazu jsou užity pro první krok jako vstupní.

Prvním řešeným úkolem byla volba podmínky ukončení algoritmu. Užívány jsou dva přístupy vyplývající z účinnosti a homogenity optimalizovaného obrazu.

Dosažené výsledky byly zlepšeny zohledněním počtu úrovní exponované struktury již v průběhu výpočtu.

Posledním krokem zlepšování výsledků optimalizace byla implementace úpravy algoritmu IFTA publikované Prof. Richterem v [20] [21] [22]. vycházející z myšlenky zachování šumu vně zvoleného okna, považovaného za kritické, a úpravou požadovaných bodů vynásobením koeficientem zvětšení.

5.1.3 Vliv volby velikosti bodu generované struktury

Dříve používané omezení minimální velikosti elementární expozice na čtverec $0,5 \mu\text{m} \times 0,5 \mu\text{m}$ bylo technologické — za účelem snížení doby expozice. Vlnová délka monochromatického světla užívaného pro rekonstrukci počítačem generovaných hologramů je však cca $\lambda=640 \text{ nm}$. Z mřížkové rovnice vyplývá, že maximální úhel difrakce na reliéfu s minimálním detailem $\Lambda=1000 \text{ nm}$ je 40° . Obraz difrakce je podle pravidel Fourierovy transformace kopírován do vyšších difrakčních řádů. Pro zvýšení difrakční účinnosti byla navržena volba rastru struktury menší než jedna polovina vlnové délky. S rostoucím rozlišením rastru struktury se při optimalizaci převodu dále snižuje

odchylka požadovaného obrazu difrakce od rekonstruovaného. Z těchto důvodů vzešel požadavek na návrh počítačem generovaných hologramů v mezním rozlišení.

5.1.4 Převod difraktivní struktury na expoziční data

Za účelem snížení expoziční náročnosti byly navrženy tři algoritmy pro převod grafických vstupů na expoziční data vycházející z různých myšlenek.

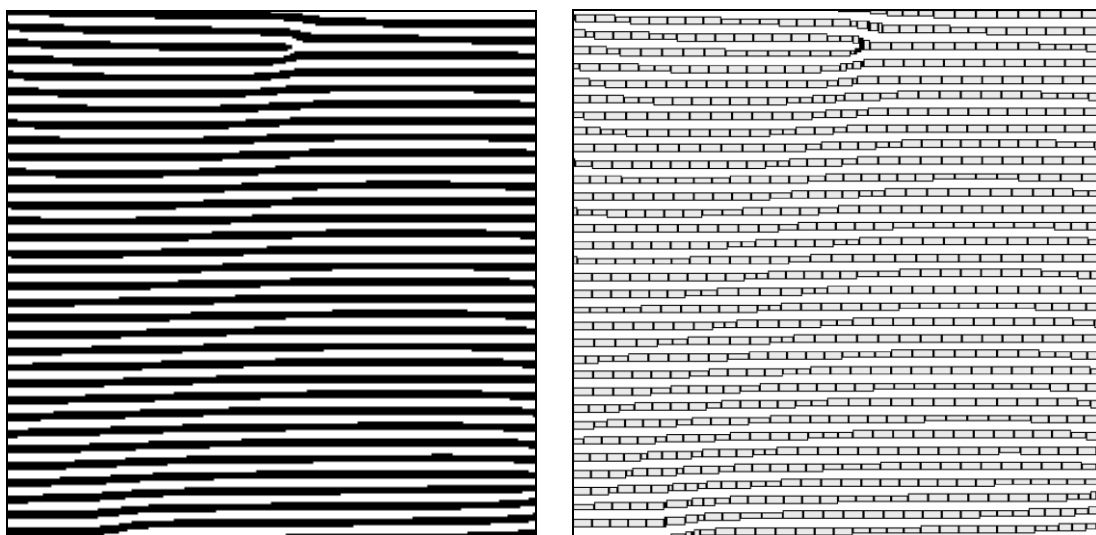
První algoritmus byl navržen pro struktury skládající se z téměř rovných čar. Myšlenkou algoritmu bylo:

1. nalezení souvislé čáry,
2. vybrání částí stejné tloušťky
3. rozdělení částí delších než maximální povolená velikost elementární expozice na pokud možno stejně dlouhé části

Byly užity následující metody pro dosažení lepších výsledků převodu:

1. stanovení pořadí expozice elementárních expozic v místech, kde se čáry dělí,
2. vypuštění elementárních expozic menších než je povolené minimum a náhrada většími
3. úprava času expozice elementárních expozic v závislosti na jejich velikosti

Ukázka příkladu se simulací výsledku převodu 1. algoritmem je na obr. 5.3.



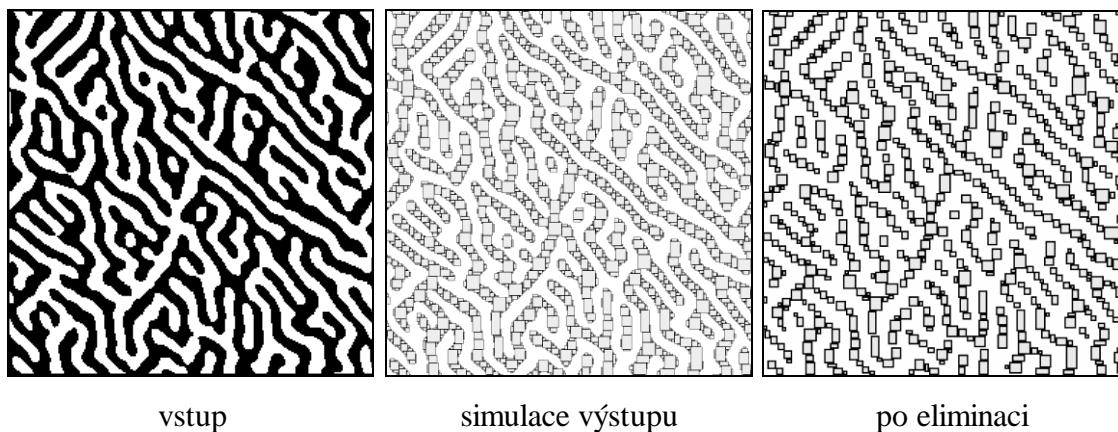
vstupní převáděná bitmapa

simulace výstupu algoritmu 1

Obr. 5.3 Algoritmus pro převod bitmap skládajících se z téměř rovných čar

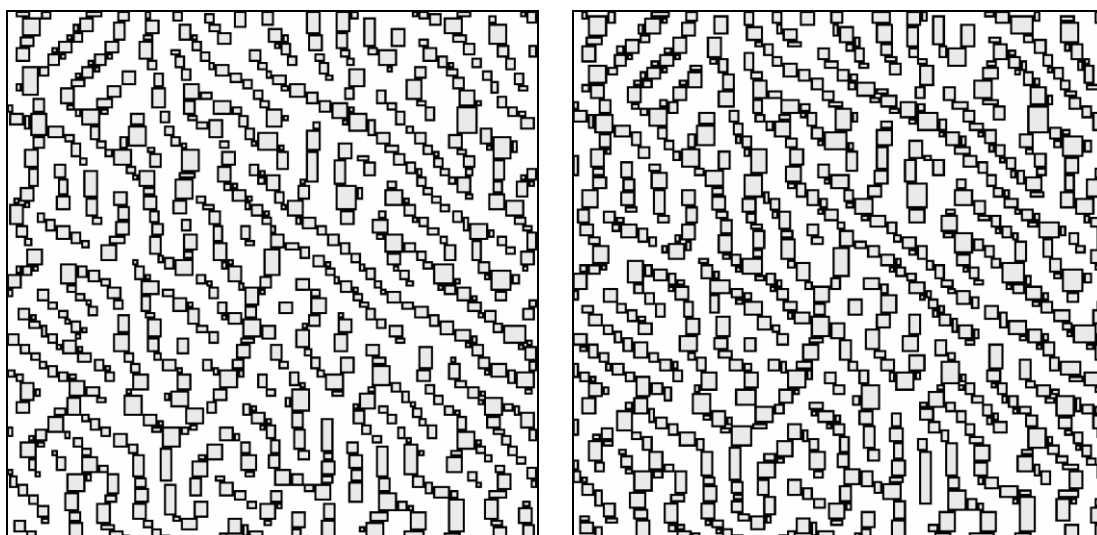
Druhý algoritmus byl navržen pro obecné struktury. Vychází z myšlenky vyhledávání vždy největší realizovatelné elementární expozice v převáděné bitmapě. Maximální velikost elementární expozice je dána jako vstupní parametr.

Výstup algoritmu již zohledňuje vztah velikosti elementárních expozic a času jejich expozice. Pro snížení expoziční náročnosti byla výstupní data přerozdělena do subpolí o zvolené velikosti a byly z nich eliminovány elementární expozice menší než zvolené minimum. Dalšího snížení časové náročnosti expozice bylo dosaženo myšlenkou exponovat pokud možno souvislé čáry. Řazení elementárních expozic umožnilo sdružování vypouštěných elementárních expozic většími. Nevýhodou druhé úpravy je zvýšení počtu instrukcí nastavujících čas expozice jednotlivých elementárních expozic. Užití algoritmu dva a simulace výstupu po vypuštění příliš malých elementárních expozic je na obr. 5.4.



Obr. 5.4 Algoritmus pro převod obecných bitmap (difraktivních struktur)

Třetí navržený algoritmus umožňuje expozici elementárních expozic přesahující hranice vymezené převáděnými vstupními daty. Výstupy posledních dvou popsaných algoritmů je možno porovnat na obr. 5.5.



simulace výstupu algoritmu 2 po eliminaci
elementárních expozic menších než povolená

simulace výstupu algoritmu 3

Obr. 5.5 Simulace výstupů algoritmu dva po eliminaci a tři

Algoritmy byly publikovány autorem v [48].

5.1.5 Zpracování víceúrovňových CGH

Difraktivní struktury generované pomocí Fourierovy transformace jsou v laboratoři EBL nejčastěji využity pro realizaci binárních reliéfů počítačem generovaných hologramů (CGH). Pro zvýšení intenzity difraktovaného obrazu jsou realizovány i reliéfy víceúrovňové. Víceúrovňové struktury přináší možnost realizace středově nesymetrických obrazů difrakce.

Obraz je převeden na difraktivní strukturu v rozlišení odpovídajícím minimální povolené velikosti elementární expozice. Eliminací elementárních expozic menších než povolené minimum by mohlo dojít ke vzniku mezer mezi jednotlivými úrovněmi hloubky, kterému je nutno předejít. Difraktivní struktura je následně zaokrouhlením hodnot fáze komplexních čísel na straně difraktivní struktury převedena na požadovaný počet úrovní pro expozici. Jednotlivé úrovně jsou exponovány samostatně s expozičními časy odpovídajícími požadované výšce reliéfu. Úrovně by bylo možno realizovat také překrýváním elementárních expozic. Nevýhodou by bylo zvýšení času expozice, proto není tato možnost prakticky využívána.

Ukázka difrakce je na obr. 5.6. Obraz difrakce byl promítán na list papíru držený v ruce, čímž došlo k deformaci obrazu.



Obr. 5.6 Ukázka nesymetrického obrazu difrakce

5.2 Difraktivní struktur generovaných využitím Fourierovy transformace pro optické prvky

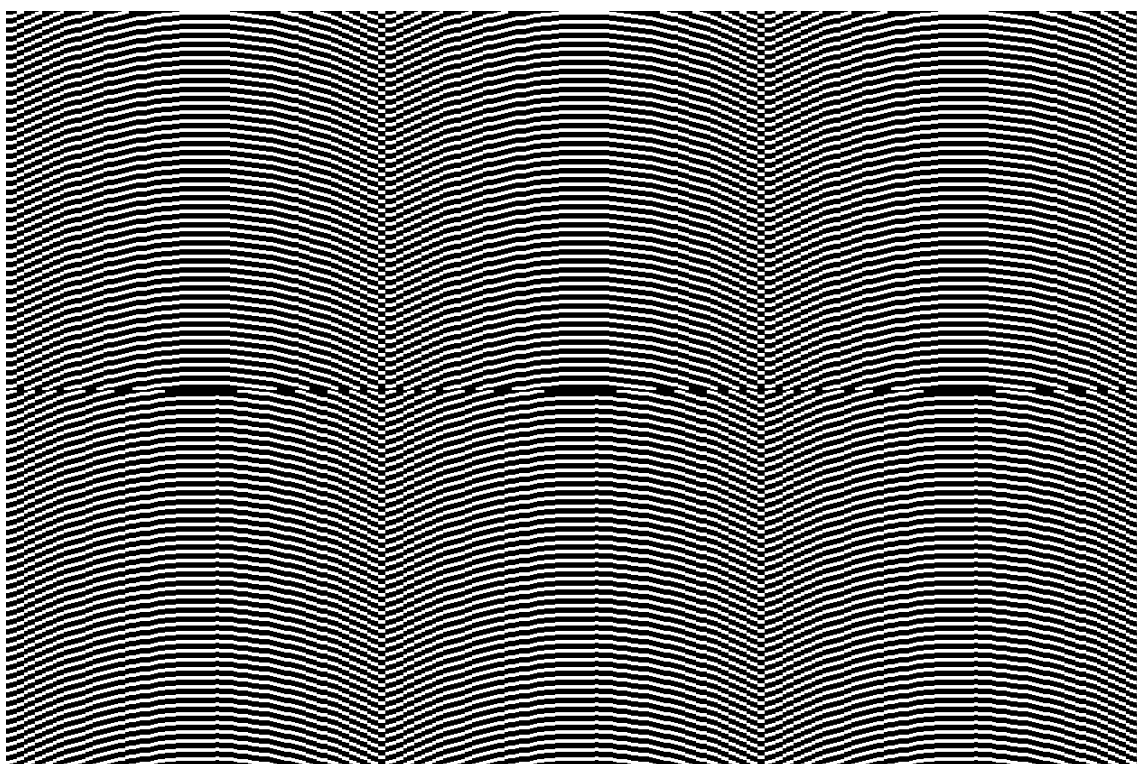
Další oblastí využití postupu popsaného v kapitole 5.1 jsou optické prvky pozorovatelné okem. Oproti prvkům se skrytým obrazem mají často jednodušší požadovaný obraz difrakce, který umožňuje použití jednorozměrné Fourierovy transformace namísto dvourozměrné, což vede k výraznému snížení časové náročnosti výpočtu.

5.2.1 Použití iterativní Fourierovy transformace

Optimalizační metoda iterativní Fourierovy transformace je časově náročná. Časová náročnost vyplývá především z nutnosti počítat dvakrát v každé iteraci dvourozměrnou Fourierovu transformaci. Myšlenkou zvýšení výpočetního výkonu proto byla náhrada dvourozměrné Fourierovy transformace jednorozměrnou. Podmínkou použití byla shodná alespoň jedna ze všech souřadnic polohy bodů v požadovaném obrazu difrakce pro všechny body. Využití našla u šterbinové mřížky, která je vhodná pro grafické motivy viditelné ze zvoleného intervalu úhlů. Další úspěšnou aplikací popsané metody byly efekty dosahované kombinací větších počtů difrakčních mřížek v jednom místě plochy.

5.2.2 Štěrbinová mřížka

Reliéfem difrakujícím světlo do více bodů v linii je štěrbinová mřížka. Vstupem optimalizace využívající jednorozměrné Fourierovy transformace je jednorozměrná matice komplexních čísel, jejíž body zastupují obraz. Výstupem je matice bodů, jejichž fáze určují posun elementárních expozic v intervalu, jehož velikost odpovídá zvolené periodě. Body výstupní matice jsou sdružovány do elementárních expozic metodou odpovídající prvnímu popsanému algoritmu pro převod difraktivních struktur na expoziční data. Výstup převodu je kompatibilní s obecným i maticovým přístupem expozice dat. Plocha vyplněná štěrbinovou mřížkou je na obr. 5.7.



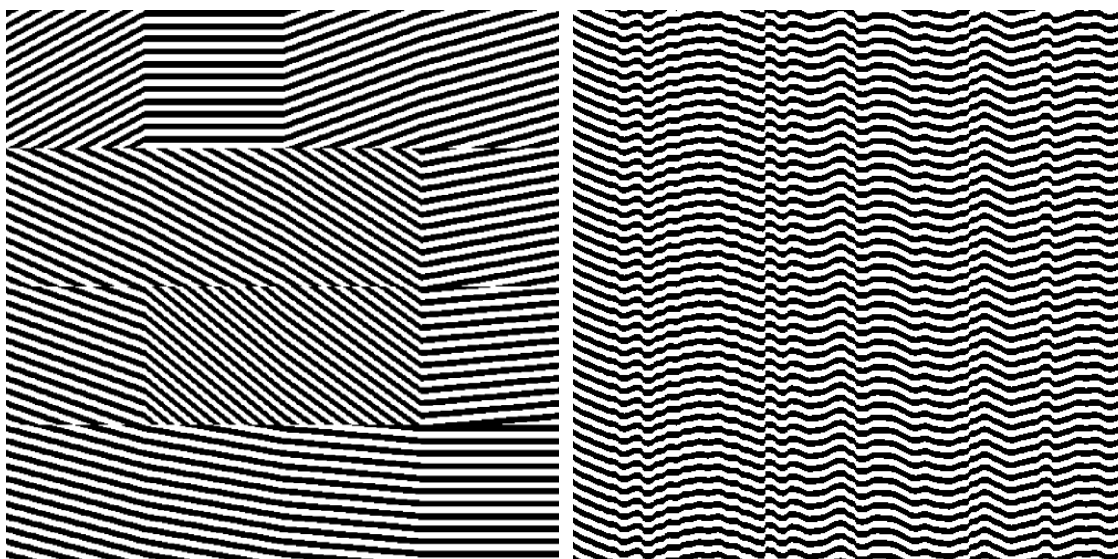
Obr. 5.7 Plocha vyplněná štěrbinovou mřížkou

5.2.3 Efekt kombinace většího počtu difrakčních mřížek realizovaný syntetickým hologramem

Další úspěšnou aplikací byla náhrada matice difrakčních mřížek kombinovaných v jednom místě plochy syntetickým hologramem. Generované syntetické hologramy se však pro jednotlivé body grafiky liší a proces návrhu je proto úměrně jejich počtu nutno opakovat. Podmínkou využití jednorozměrné Fourierovy transformace je náhrada kombinace difrakčních mřížek se shodnou periodou.

Difrakce na exponované struktuře difraktující světlo do všech požadovaných směrů potvrdila předpoklad zvýšení rozlišení grafiky a odstranění parazitních bodů difrakce v porovnání s kombinací více difrakčních mřížek v jednom místě plochy hologramu.

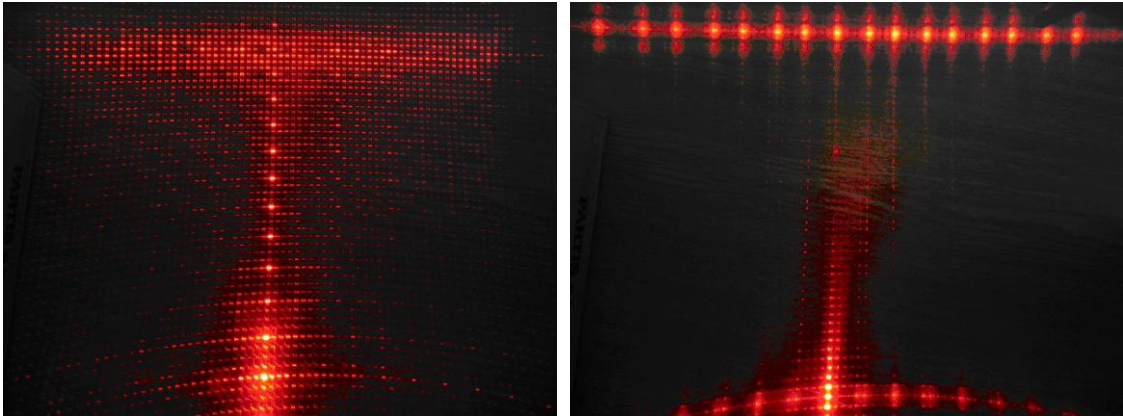
Vztah rozlišení a počtu úhlů pohledu zůstává beze změny; je proto často výhodné zachovat rozlišení a definovat více úhlů pohledu. Výhodou zachování rozlišení je také vyšší množství různých realizovatelných intenzit, kterým odpovídá počet exponovaných čar. Porovnání expozičních dat realizovaných maticovým rozmístěním mřížek generovaných maticový přístup expoziční dat a stejného zadání realizovaného syntetickým hologramem je možno na obr. 5.8.



Obr. 5.8 Porovnání dat maticového rozmístění se syntetickým hologramem

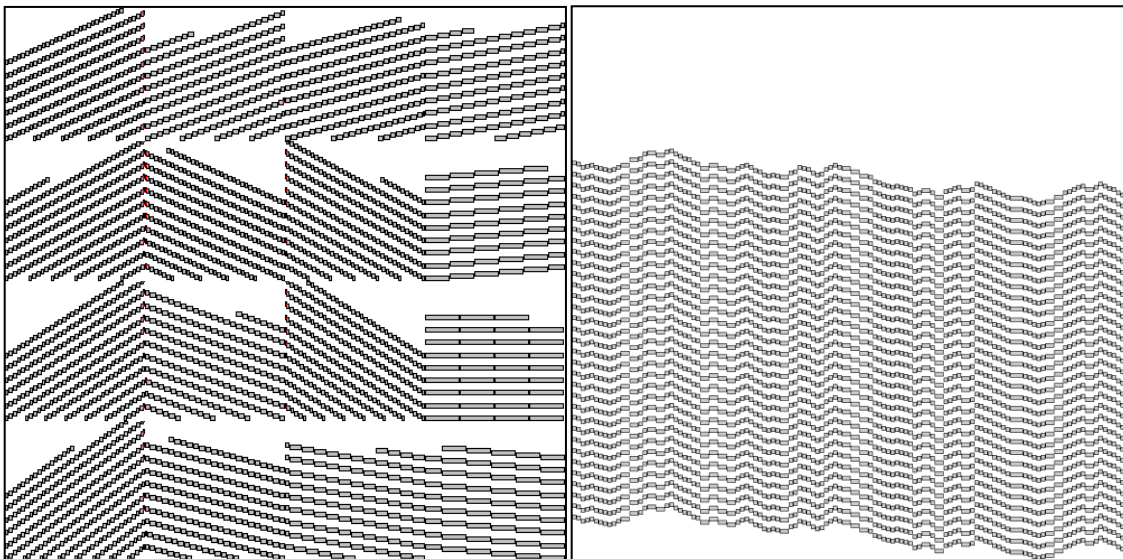
Při zachování vstupního parametru velikosti difrakční struktury bylo možné realizovat v rozsahu odpovídajícím minimálnímu a maximálnímu úhlu natočení mřížek použitých v maticově seřazeném zadání 71 různých úhlů natočení, ze kterých,

pro dodržení zadání, bylo realizováno pouze 16. Ukázka difrakce na strukturách uvedených na obr. 5.8 je na obr. 5.9.



Obr. 5.9 Difrakce na maticově umístěných mřížkách a syntetickém hologramu

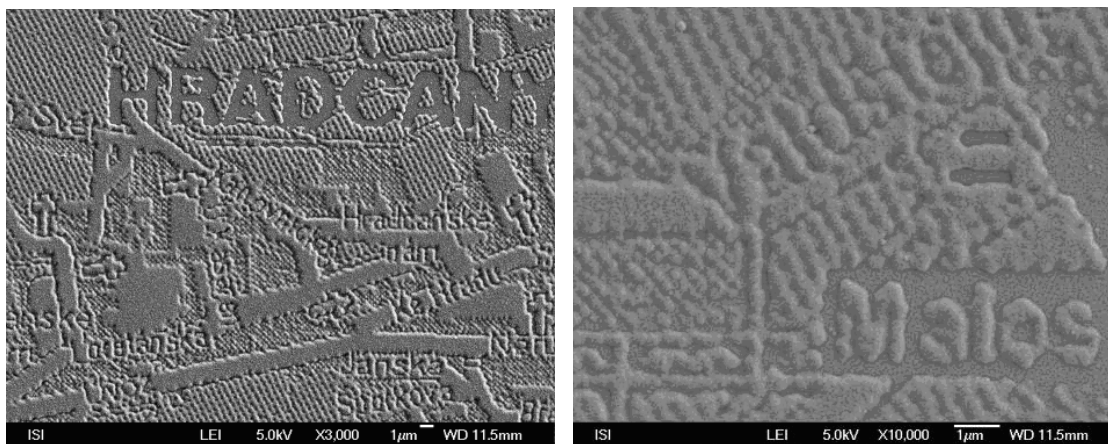
Popsané postupy byly s výhodou aplikovány i na efekty dosahované kombinací mřížek s nastavenou difrakční účinností. Příklad simulace expozičních dat připravených metodou maticového rozmístění a vygenerováním syntetického hologramu je pro lepší představu uveden na obr. 5.10.



Obr. 5.10 Porovnání dat maticového rozmístění se syntetickým hologramem

5.3 Využití algoritmů pro převod obrazu na expoziční data litografu pro nedifraktivní struktury

Algoritmus pro převod bitmap byl využíván i pro převod nedifraktivních struktur. Veřejně přístupným použitím byla mapa Prahy při expozici hologramu popsaného v [46]. Pro dokumentaci dosažených výsledků jsou dva z obrázků získaných skenováním rastrovacím elektronovým mikroskopem uvedeny na obr. 5.11.

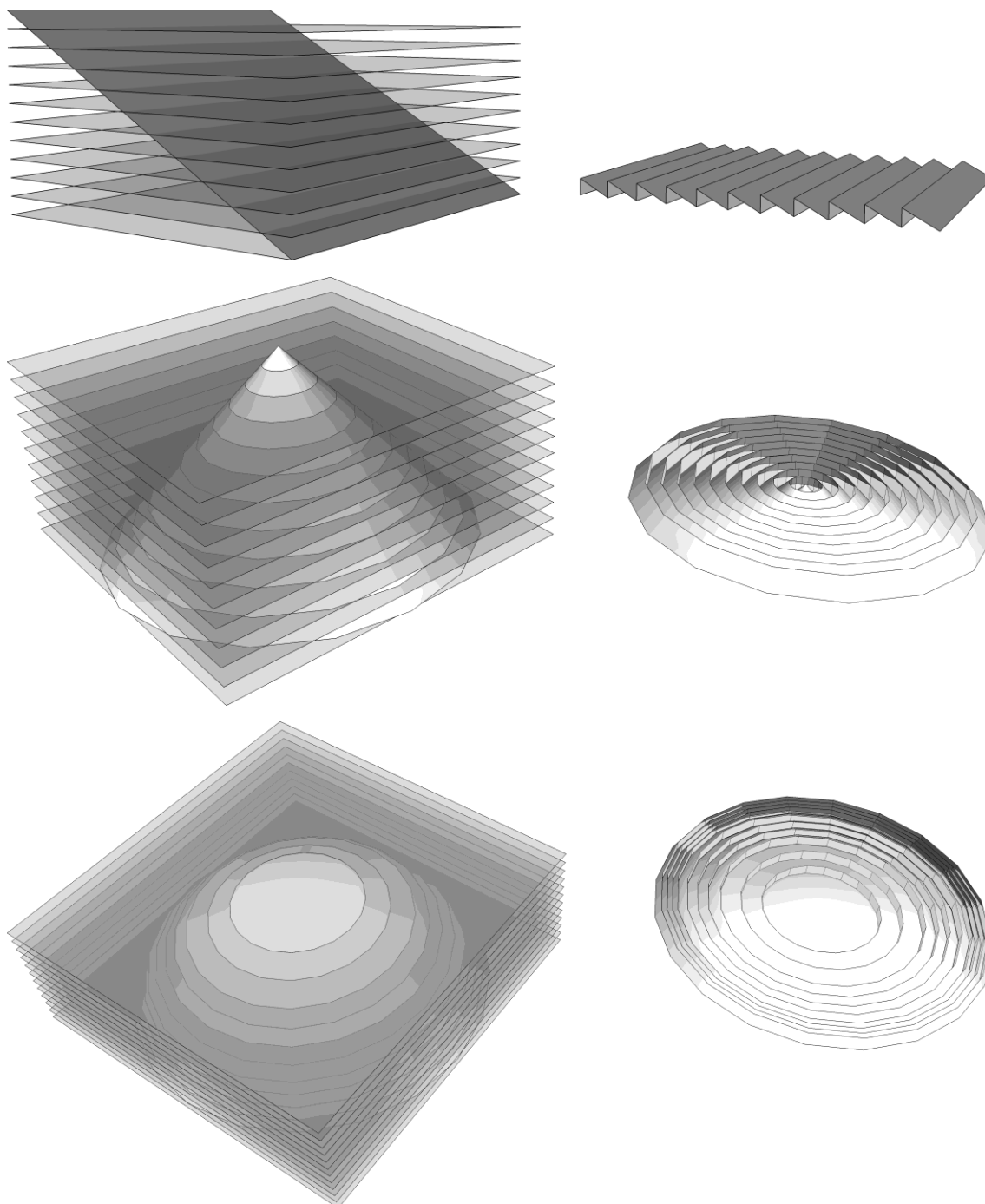


Obr. 5.11 Obrázky z elektronového mikroskopu ve zvětšení 3.000 a 10.000

Popsané využití bylo prvním případem, kdy bylo nutno algoritmus rozšířit o dělení na expoziční pole.

6 Zonální struktury

Pod pojmem zonální struktury rozumíme difrakční struktury, které obecně nemusí mít zřejmou periodicitu v Kartézské soustavě. Typickým příkladem je Fresnelova (zonální) čočka, patří sem rovněž kruhová mřížka.



Obr. 6.1 Příklady odvození zonálních struktur

Z hlediska difrakčního diagramu dávají zonální struktury spojitou odezvu. Na difrakční mřížky, které jsou na obr. 6.1 uvedeny jako první, můžeme v této souvislosti pohlížet jako na velmi jednoduchý případ zonální struktury.

Na difrakčním diagramu nalezneme vždy obraz odpovídající derivaci rovnice popisující zvolenou plochu. Pro příklady uvedené na obr. 6.1 to budou pro rovinu průmět svazku, pro kouli kruh a pro kužel mezikruží. Podmínkou získání očekávaného obrazu difrakce je však zajištění dopadu svazku světla na celou plochu difrakční struktury.

Zonálním strukturám je možné se přiblížit diskrétním maticovým přístupem, kdy jednotlivé části zonální struktury jsou nahrazeny segmenty vyplněnými jednoduchými mřížkami s odpovídajícími parametry. Platí však následující: požadavek na vysoké rozlišení motivů, požadavek na malou velikost segmentu, není možné dosáhnout návaznosti v čarách, oblasti s prudkou změnou parametrů nelze přesně aproximovat, oblasti s dlouhou periodou nelze přesně aproximovat.

Tato poznámka se týká možnosti realizovat zonální struktury jinými přístupy. Vhodně zvolená zonální struktura tedy představuje silný bezpečnostní prvek. V této souvislosti můžeme podotknout, že zonální bezpečnostní prvky použité v maticovém přístupu expozice dat byly vcelku ojedinělým a význačným motivem. Jedná se o prvky označované SOE (speciální optický element, zonální kužel, kruhová mřížka) a LEN (Fresnelova zonální čočka).

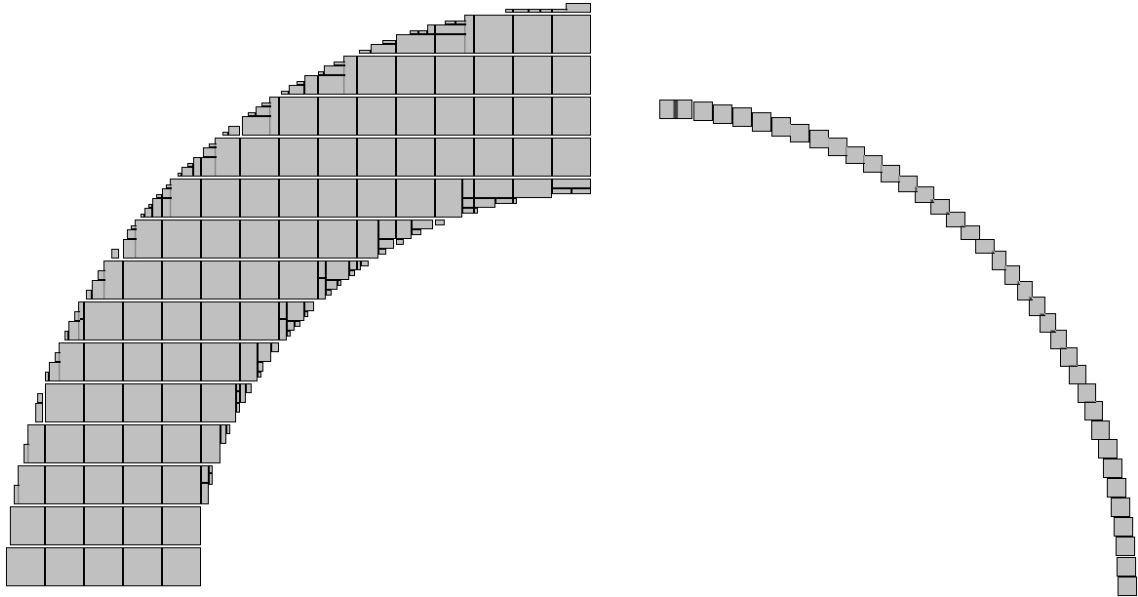
6.1 Výchozí stav řešení

Pro vysvětlení významu práce popsaného dále v této kapitole, je nejprve popsán výchozí stav řešení problematiky (k roku 2002) a jeho omezení.

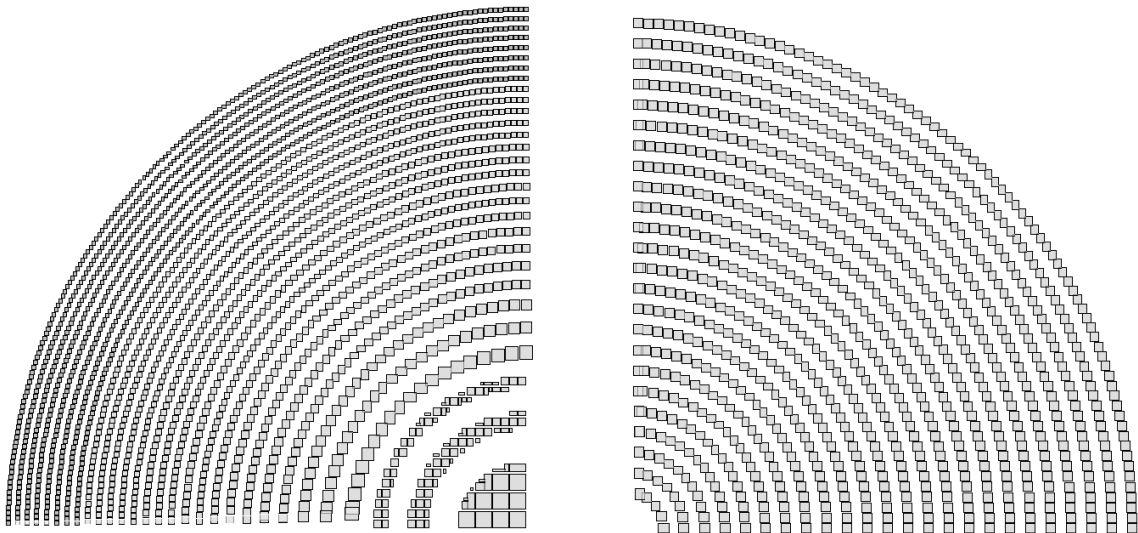
Při popisu se omezíme na dva základní případy již dříve zmíněné, tedy SOE a LEN. Při vytváření těchto struktur se využívalo makroinstrukcí jazyka Asbest [15] pro vykreslení kružnice a mezikruží. Pojmu kružnice zde používáme pro úzká mezikruží, jehož šířka je menší než maximální velikost elementárních expozic, jimiž je mezikruží vyplněno; kružnice (KRT) je tedy tvořena posloupností sousedících elementárních expozic. Naproti tomu mezikruží (KRU) je širší a příčně je tvořeno více elementárními expozicemi.

Ohraničení oblasti vyplněné zonální strukturou je dáno vnější vykreslenou čarou (kružnice resp. mezikruží) nebo dosahem vychylování v rámci jednoho expozičního pole (čtverec případně obdélník). Jiné tvary nejsou jednoduše realizovatelné.

Všechna makra a ukázky jejich výstupů na obr. 6.2 a obr. 6.3 popisují binární struktury.



Obr. 6.2 Mezikruží (KRU) a kružnice (KRT), jeden kvadrant; poloměry mezikruží 20 a 30 mikronů, poloměry kružnice 24 a 25 mikronů.



Obr. 6.3 Zonální čočka (LEN) a zonální kužel (SOE), jeden kvadrant; parametry čočky: poloměr 30 um, ohnisko 30 um (λ 550 nm), parametry kužele: poloměr 30 um, rozteč čar 1.2 um.

S pomocí algoritmů pro vykreslení mezikruží lze poměrně jednoduše generovat struktury typu SOE a LEN. Jak ukazuje obr. 6.3. SOE tvoří 24 kružnic (KRT) v pravé části obr. 6.3 a LEN tvoří 26 kružnic (KRT) a 3 mezikruží (KRU) v levé polovině obr. 6.3.

Celková velikost zonální struktury může přesahovat velikost expozičního pole. Realizace těchto struktur je však významně složitější. Navíc je algoritmus pro vykreslení mezikruží koncipován pro funkci on-line (výpočet struktury probíhá paralelně s vlastní expozicí), což v případě rozměrných struktur výrazně zpomaluje a komplikuje vlastní expozici.

Omezení popsaného přístupu na zonální struktury tvořené výhradně z mezikruží je zřejmé. Požadavek na zobecnění definice zón vyžaduje nový přístup řešení problematiky.

6.2 Vypracované řešení

Požadavky na nový algoritmus vyplývají z výchozího stavu popsaného v kapitole 6.1. Jsou jimi:

- zobecnění ohraničení oblasti zonální struktury
- zobecnění definice zón
- off-line přístup (data jsou zkompileována před spuštěním expozice)
- hierarchie expozice (expoziční pole a expoziční okna)
- ošetření jevu rozptylu elektronů
- rozšíření o možnost zadání vztahů pro úpravu vypočtených poloh generovaných elementárních expozic (je nazýváno zkreslení křivky)

Byl vyvinut algoritmus využívající především výhody možnosti definice tvaru exponovaných křivek rovnicemi pro dosažení minimálního počtu elementárních expozic při zachování maximální přesnosti tvaru křivky.

Výstupem algoritmu jsou soubory s daty pro jednotlivá expoziční pole, ve kterých jsou elementární expozice křivek seřazeny návazně v oblastech expozičních oken.

Vstupem algoritmu jsou definice

- plochy exponovaných struktur zadané grafickým motivem, nazývaným maska,
- barev v grafickém motivu s přiřazením označení ostatním vstupům algoritmu,
- velikosti bodu grafického motivu v desetinách mikrometru,
- polohy středu kartézské soustavy na grafickém motivu,

rovníc křivek*,

- velikosti expozičního pole,
- velikosti expozičního okna,
- maximální velikost strany elementární expozice,
- minimální velikost strany elementární expozice,
- dosah elektronů způsobený jejich rozptylem.

***) Pro generování rovnic křivek byly použity pouze kružnice. Pro jejich generování byla nutná definice**

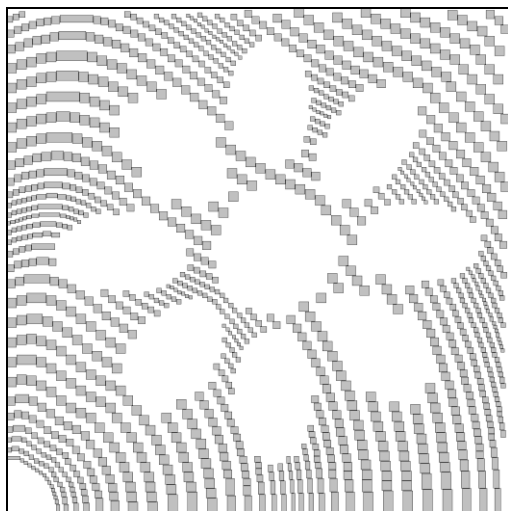
- rovnic rozvoje parametrů křivek (pro kružnici jím byly rozvoje jejich vzdáleností v závislosti na vzdálenosti od středu),
- rovnic změny vypočtené polohy elementární expozice, nazývané deformace**,
- rovnic rozvoje parametrů rovnic zkreslení

***) byly zadávány odlišné rovnice deformace pro různé části kružnice, což vycházelo z požadavku návrháře difraktivní struktury na výsledný tvar. V realizovaném případě jím byla závislost vzdálenosti právě zpracovávané elementární expozice od středu zonální struktury a úhel její polohy vůči horizontální ose v kartézské soustavě.

Možnosti algoritmu jsou představeny na zjednodušeném příkladu. Zjednodušení spočívá především v zadání, které omezí vstupní parametry tak, aby výstup bylo možné zobrazit na jediném obrázku a přitom bylo znázorněno co nejvíce z popsanych rozšíření.

Stanoveného cíle možnosti zobrazení na jediném obrázku bylo dosaženo volbou velikosti strany exponované plochy čtvercového tvaru $100\mu\text{m}$. Grafickým motivem byl zvolen obrázek s na první pohled zřetelným objektem.

Výstupu algoritmu je uveden na obr. 6.4.



Obr. 6.4 Ukázka výstupu algoritmu pro generování zonálních struktur

6.3 Dosažená zlepšení

Algoritmus použitý pro generování zonálních struktur využívá výhod znalosti matematického popisu čar, ze kterých difrakční struktura sestává, ale díky možnosti zadat deformace neomezuje čáry pouze na jednoduchý geometrický tvar, kterým je v popsaném případě kružnice. Znalost matematického popisu čar umožňuje snížení počtu elementárních expozic na minimálně možný a současně přináší možnost zohlednění aktuálního technologického stavu elektronového litografu.

Při řešení bylo uvažováno dělení elementárních expozic do expozičních polí za účelem zajištění minimálního expozičního času, které bylo v předchozích kapitolách práce užito pouze v úpravě algoritmu pro převod obecných bitmap na expoziční data elektronového litografu ve verzi pro nedifrakční struktury (viz odstavec 5.3), který byl využíván pro zpracování rozsáhlejších vstupů.

Z hlediska výstupu je v celé popisované práci naprosto jedinečný zápis do binárních souborů, který byl nezbytný vzhledem k extrémně vysokému počtu generovaných instrukcí.

Možnost maskování byla prvním z požadavků, který celou práci na vývoji nástroje pro generování zonálních struktur vyvolal, a proto je ji možno považovat za největší přínos z hlediska návrhu zonálních struktur.

Využitelnost zonálních struktur je i v oblasti technické (Fresnelovy difrakční zonální čočky). Zonální struktury spadají pod patent [50] společnosti Optaglio s.r.o.

Shrnutí zvolených způsobů pro dosažení stanovených cílů:

- zobecnění ohraničení oblasti zonální struktury bylo dosaženo umožněním volby plochy, na které je zonální struktura generována, které přináší nejen zobecnění ohraničení, ale také možnost vložit kamkoli do plochy generované zonální struktury mezeru nebo dokonce jinou difrakční strukturu,
- zobecnění definice zón bylo dosaženo umožněním definovat změnu vzdálenosti jednotlivých kružnic rovinami, což umožňuje například nedefinovat zonální strukturu, která bude vypadat jako hladina klidné vody ve chvíli, kdy na ni dopadá kapka,
- off-line přístup je používán v celé práci; data generovaná pro počítačem generované hologramy však dosahovala počtů elementárních expozičních v tisících; s nutností generovat data pro zonální struktury, kde se počty generovaných elementárních expozičních pohybovaly při velikosti exponované plochy v desítkách milimetrů, ve stovkách milionů, přišla nutnost snížit objem dat; poprvé byl použit binární výstup algoritmu, čímž jsme ovšem ztratili výhody možnosti snadných úprav,
- expoziční do jednotlivých polí a oken bylo dosaženo návrhem algoritmu,
- ošetření jevu rozptylu elektronů bylo dosaženo zavedením možnosti definice dosahu elektronů rozptýlených při dopadu, které ovlivňuje přímo šířku exponované křivky a zahrnutím určení expozičního času elementární expoziční z velikosti stran elementární expoziční,
- deformace ploch zonálních struktur byla dosažena užitím rovnic popisujících deformaci při výpočtu polohy bodu.

7 Velkoplošné struktury

Velkoplošné struktury jsou difraktivní struktury, jejichž velikosti dosahují řádu jednotek cm^2 , složené z mnoha expozičních polí velikostí řádu jednotek mm^2 . Cílem práce bylo dosažení homogenní difraktivní struktury složené z navazujících expozičních polí.

Během studia byl vyvinut nástroj pro kalibraci expozičního pole litografu zkracující dobu kalibrace z řádu hodin na minuty. Úspěšná kalibrace expozičního pole zajistila návaznost vedle sebe ležících expozičních polí. Snížení rozeznatelnosti jednotlivých expozičních polí s nehomogenní účinností v jejich různých částech bylo dále rozšiřováno.

7.1 Kalibrace vychylovacího pole elektronového litografu BS600

Kalibrace geometrie vychylovacího pole litografu byla řešena již při jeho návrhu. Původní řešení kalibrace bylo hardwarové a bylo založeno na řešení matice rovnic vyššího řádu, protože bylo navrhováno pro expoziční pole velikosti 6,4 mm. Přestavba litografu koncem 90. let, zrušení původního řešení kalibrace z důvodu nízké spolehlivosti (nalezení značky při mechanických problémech při různých hodnotách proudu ve svazku - signálu sekundárních elektronů) vedlo k náhradě hardwarové kalibrace nejdříve "ručním" postupem složeným z expozice kalibračních značek, vyvolání, změření odchylek, výpočet kalibračních odchylek a jejich použití pro další expozici. Následně byly testovány různé metody kalibrace a matematické modely zkreslení vychylovacího pole. V současnosti je používán prakticky ověřený matematický model, předpokládající dostatečnou linearitu zkreslení při vychýlení svazku v rozsahu prakticky používaných velikostí expozičního pole, který dělí kalibrované expoziční pole jen na čtyři kvadranty. K velké změně v postupu kalibrace došlo až po integraci rastrovacího elektronového mikroskopu (REM) do řídicího software litografu, kdy byl celý postup od naskenování kalibrační značky po výpočet kalibračních koeficientů automatizován, čímž bylo dosaženo především výrazného snížení doby potřebné ke kalibraci.

7.1.1 Matematický model

Kalibrace je prováděna úpravou nominálního proudu vychylovacích cívek v závislosti na cílové poloze svazku dle dvourozměrného polynomu druhého řádu, který je zde uveden po přepsání do maticového tvaru:

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_X & B_X & C_X & D_X \\ A_Y & C_Y & B_Y & D_Y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ X \\ Y \\ X \cdot Y \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Změříme-li odchylky ideální a skutečné polohy kalibrační značky ve čtyřech bodech expozičního pole, lze vypočítat kalibrační koeficienty dle rovnice:

$$\begin{bmatrix} A_X & B_X & C_X & D_X \\ A_Y & C_Y & B_Y & D_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_1 & \Delta X_2 & \Delta X_3 & \Delta X_4 \\ \Delta Y_1 & \Delta Y_2 & \Delta Y_3 & \Delta Y_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 \\ X_1 \cdot Y_1 & X_2 \cdot Y_2 & X_3 \cdot Y_3 & X_4 \cdot Y_4 \end{bmatrix}^{-1} \quad (7.2)$$

Význam symbolů v rovnicích (1), (2): ΔX , ΔY jsou změřené odchylky pro danou ideální pozici X , Y . A_x, \dots, D_y jsou kalibrační konstanty.

7.1.2 Zpracování

Kalibrace je provedena ve třech krocích: 1. sejmутí obrázků značek v REM módu ve všech čtyřech rozích každého z kvadrantů, 2. vyhledání středů všech značek, 3. výpočet korekčních odchylek. Odchylky jsou odečítány z polohy dříve naexponovaných pokovených značek umístěných na rámečku s uchyceným substrátem. Substrát, na který se exponují difraktivní struktury, a substrát se značkou sloužící pro kalibraci nejsou z důvodu mechanické nepřesnosti ve stejné výšce, což bylo nutné pro zvýšení přesnosti kalibrace ve výpočtu zohlednit. Obrázky jsou snímány skriptem (Visual Basic Skript) bez nutnosti zásahu operátora. Skript je možno použít ve dvou režimech – s pojezdem a bez pojezdu stolu. Použití varianty bez pojezdu stolu je podmíněno použitím sady matice značek naexponovaných v požadovaných vzdálenostech a následným použitím korekce přesnosti polohy těchto značek. Přesto, že by výhodou kalibrace bez pojezdu stolu byla úspora času, není dosud žádná sada značek dostatečně dobře zdokumentována. Používá se tedy varianta s pojezdem stolu, kdy stůl postupně pojíždí se značkou do požadovaného počtu poloh v rámci expozičního pole.

Obrázky jsou snímány při nejvyšším použitelném zvětšení, které je dáno především předpokládanou velikostí odchylek, ale také velikostí značky; jeden bod odpovídá 0,1 μm . Obrázky jsou velikosti 512×512 bodů, odchylky tedy mohou přesahovat i 20 μm .

Obrázky je nutno po sejmutí analyzovat. Analýza spočívá v nalezení středu značky. Pro analýzu obrázků i následný výpočet kalibračních koeficientů výše uvedené rovnice bylo zvoleno prostředí MATLAB.

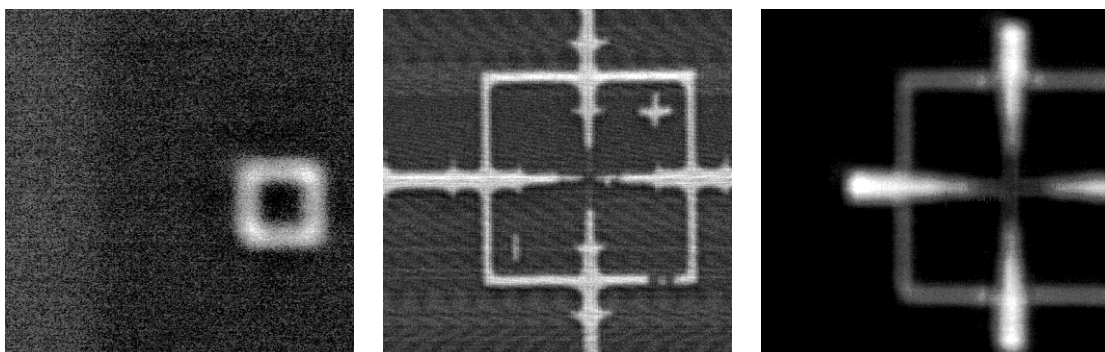
7.1.3 Funkce pro analýzu obrazu

Cílem analýzy je nalezení souřadnic středu značky v obrázku. K vyhledání je využito vlastností prvního řádu Fourierovy transformace. Vztah pro výpočet přímé diskrétní Fourierovy transformace:

$$D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{-ink2\pi/N} \quad (7.3)$$

Algoritmus Fourierovy transformace je uplatněn na součty bodů obrázku v horizontálním a vertikálním směru. Souřadnice polohy značky odpovídají úhlu komplexních čísel prvního řádu Fourierovy transformace každého ze součtů.

Značky mohou mít různý tvar a obraz může být zatížen různým zkreslením, což dokumentuje obr. 7.1, na kterém jsou stolová, křížová odměřovací a rámečková značka. Při snímání obrázků je nutné, aby parametry optické soustavy litografu byly již nastaveny pro následnou expozici. Úpravou parametrů za účelem získání kvalitnějšího obrazu by byla do procesu kalibrace zavedena systémová chyba.



Obr. 7.1 Typy analyzovaných značek (zleva: stolová, křížová a rámečková)

Pro odstranění šumů z obrázku je implementován filtr, který nastaví hodnotu všech bodů v obrázku, jejichž hodnota není vysoká alespoň jako zvolená proměnná, na nulovou, ostatním přiřadí hodnotu jedna. Pro snížení množství informace v součtech v horizontálním a vertikálním směru je implementován filtr, který nastaví hodnotu všech bodů v řadě, jejichž hodnota není vysoká alespoň jako zvolená, na nulovou, hodnotu ostatních zachová. Pro vyhlazení obrazu před odstraněním šumu je implementován filtr, který převede diskretní dvourozměrnou Fourierovou transformací definovanou vztahem

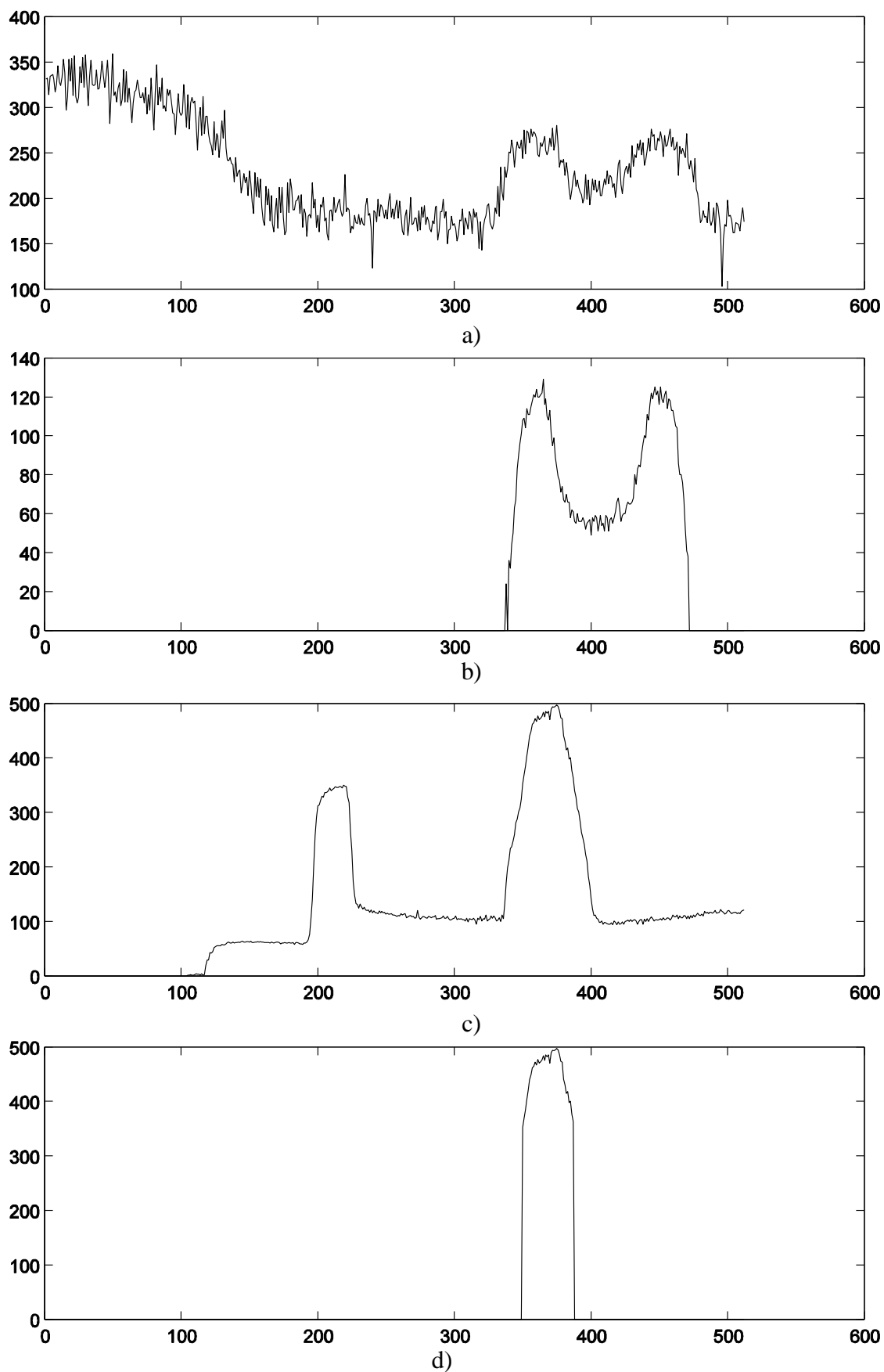
$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n} \right)} \quad (7.4)$$

obrázek do frekvenční oblasti odpovídající velikosti frekvenčního pravoúhelníku o straně odmocniny z velikosti vstupního obrázku a převede jej zpětnou diskretní dvourozměrnou Fourierovou transformací definovanou vztahem

$$f(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{u=0}^{m-1} \sum_{v=0}^{n-1} F(u, v) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{m} + \frac{vy}{n} \right)} \quad (7.5)$$

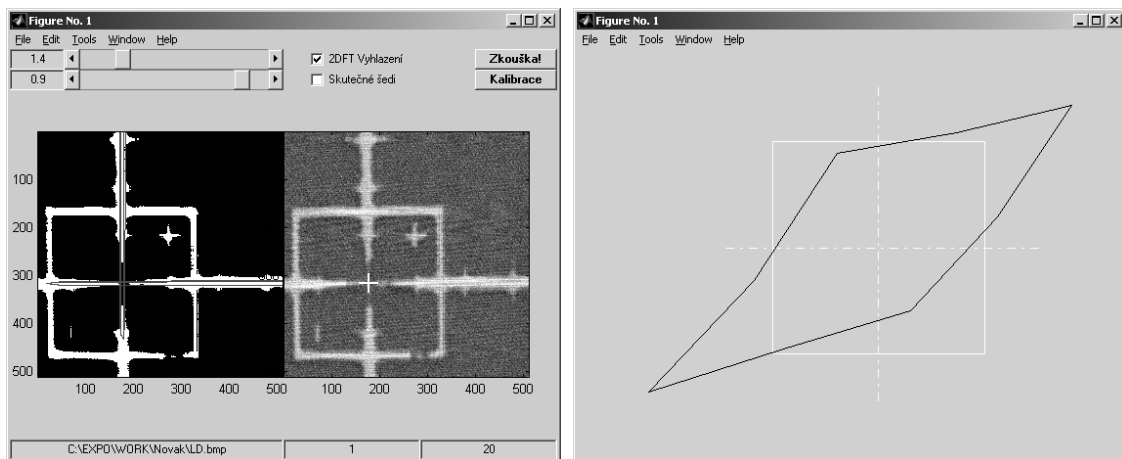
zpět na obrázek o velikosti původního obrázku. Poslední popsany filtr může ovlivnit výběr prvním popsáním filtrem natolik, že je vhodné vrátit se zpět ke vstupním hodnotám obrázku, proto byl popsany filtr implementován a je spouštěn, je-li požadován, před sečtením horizontální a vertikální řady.

Pro dokumentaci práce implementovaných filtrů a požadovaného výsledku práce s nimi slouží grafy na obr. 7.2, které jsou výstupy horizontálního součtu snímků stolové a rámečkové značky uvedených na obr. 7.1. Pro porovnání rozdílů jsou zobrazeny dvojice grafů před a po filtraci.



Obr. 7.2 Ukázka práce filtrů na značkách představených na obr. 7.1 stolové
a) vstup b) výstup filtru a rámečkové c) vstup d) výstup filtru

Funkce pro analýzu obrázků značek může zobrazit okno pro práci s výstupy doplněné o ovládací prvky umožňující změnu parametrů filtru pro odstranění šumu z obrázku nahoře, změnu filtru pro snížení množství informace v součtech, volbu použití filtrů pro vyhlazení obrazu a filtr pro návrat ke vstupním hodnotám obrázku z analýzy obrazu. Dále umožňují nastavit velikost expozičního pole, vertikální vzdálenost analyzované značky a substrátu pro expozici, parametry velikosti kříže určujícího polohu středu, zobrazuje jméno právě analyzovaného obrázku, obsahuje tlačítka pro snadnou změnu jména analyzovaného souboru na jedno ze standardních, umožňuje spustit s aktuálním nastavením parametrů analýzu znovu. Nadto obsahuje volbu počtu cyklů pro sejmutí obrázků a nakonec umožňuje spustit posloupnost funkcí, z nichž posledním výstupem je soubor kalibračních koeficientů. Popisované okno je možno vidět na obr. 7.3 vlevo.



Obr. 7.3 Analýza obrazu značky a vykreslené odchylky.

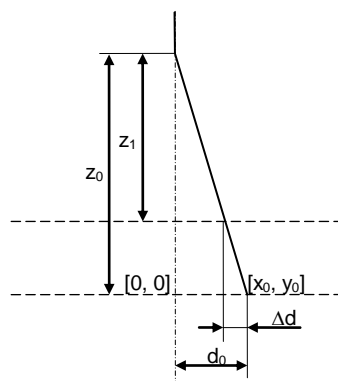
7.1.4 Podpůrné funkce

Výstupy výše uvedené funkce je nutno dále zpracovat. Práci s odchylkami a kalibračními koeficienty usnadňuje sada podpůrných funkcí řešících:

- převod polohy středů na odchylky
- změnu hodnot odchylek při posunu v ose z
- vykreslení odchylek
- výpočet kalibračních koeficientů
- zápis kalibračních koeficientů do souboru
- načtení odchylek ze souboru kalibračních koeficientů
- načtení odchylek ze souboru odchylek

7.1.5 Korekce odečtených odchylek

Snímané značky, jak již bylo uvedeno, nejsou naexponovány na substrátu, který je použit pro expozici. Oba substráty jsou umístěny v téměř stejné výšce, přesto i malá odchylka má vliv na výslednou velikost zkalibrovaného expozičního pole. Odchylka je kompenzována výpočtem, který vychází ze schématu uvedeného na obr. 7.4. Vstupními parametry výpočtu jsou velikost expozičního pole a rozdíl vertikální vzdálenosti analyzované značky a substrátu pro expozici, který je určen pokusem. Odchylky značek snímaných bez pojezdu stolu při jejich předchozí expozici v elektronovém litografu jsou zatíženy chybou pojezdu stolu. Při expozici matice značek byla chyba zkreslení vychylovacího pole eliminována náhradou vychýlení svazku pojezdem stolu. Poloha stolu je určována laserovým interferometrem s přesností $0,1 \mu\text{m}$, odchylka aktuální polohy stolu od požadované je opět kompenzována vychýlením svazku. Chyba pojezdu stolu však nesmí překročit předem stanovenou hodnotu v řádu desítek mikrometrů. Odchylky expozice byly opakovaně odečteny pomocí REM a statisticky zpracovány – tyto hodnoty však bylo nutné opět upravit dle výsledků expozice.

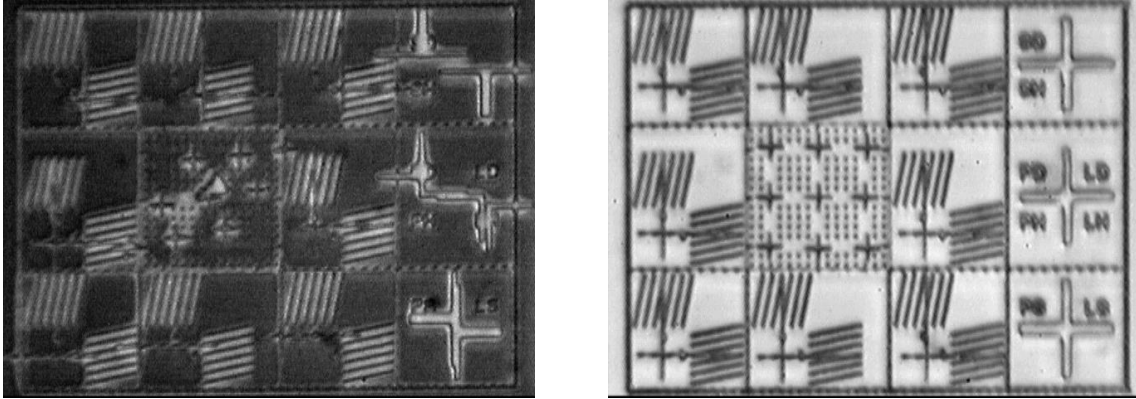


Obr. 7.4 Vliv rozdílu vzdálenosti substrátu a značek od roviny vychylovacích cívek na výchylku

7.1.6 Výsledky kalibrace

Kvalitu kalibrace udává přesnost návaznosti expozičních polí. Návaznost expozičních polí se však obtížně vyhodnocuje, protože v nejčastěji exponovaných difraktivních strukturách je možno chyby návaznosti expozičních polí jen obtížně odečíst. Chyby se v průběhu expozice mohou s měnícími se podmínkami měnit a vždy jsou zatíženy již dříve popsanou chybou pojezdu stolu. Pro hodnocení kvality kalibrace byly tedy v průběhu let vyvinuty speciální obrazce. Na obr. 7.5 je v současnosti používaný

obrazec, na kterém jsou odchylky zkreslení geometrie expozičního pole v rastru teček s krokem 2 μm obklopené stupnicemi a doplněné po pravé straně ukázkou návaznosti expozičních polí. Barevnost obrázků je dána použitým technologickým procesem. Kalibrační obrazec zobrazený vlevo je po vyvolání a vpravo již po pokovení.



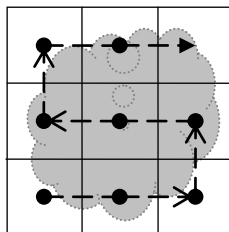
Obr. 7.5 Naexponované obrazce pro hodnocení kvality kalibrace. Nezkalibrované expoziční pole vlevo a zkalibrované vpravo

Jinou možností kontroly správnosti kalibračních konstant je sejmutí značek s kalibrací. Tato kontrola může odhalit chybu odečtení odchylky, kvalitu kalibrace však neovlivní.

Myšlenky uvedené v kapitole 7.1 byly autorem publikovány v [45].

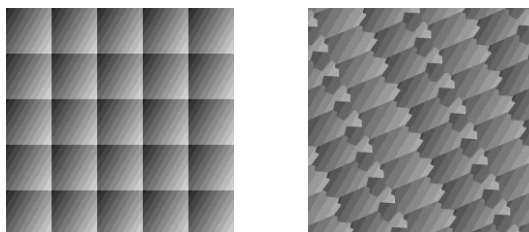
7.2 Dělení grafického motivu na pole obecného tvaru

Vychylovací pole litografu je omezeno jednak rozsahem vychylovacího systému, ale hlavně požadavkem na stabilitu zkreslení geometrie. Proto je z praktických důvodů používána velikost expozičního pole 3,2 mm. Podotkněme, že novější litografy mají velikost expozičního pole zpravidla výrazně menší (50 až 100 μm). Grafické motivy přesahující velikost expozičního pole musí být rozděleny na menší části a exponovány postupně. Přirozeným a nejjednodušším způsobem dělení obrazu na menší části jsou čtvercová resp. obdélníková pole. Posloupnost expozice jednotlivých polí byla původně vždy meandrovitá (viz obr. 7.6).



Obr. 7.6 Standardní způsob dělení a navazování expozičních polí

Bohužel, ani úspěšnou kalibrací vychylovacího pole litografu nelze odstranit nedokonalost optické soustavy, kdy při vychýlení svazku do různých směrů v rámci expozičního pole dostáváme místně odlišné elementární expozice. Snížení rušivého dojmu, který je především patrný na jednobarevných plochách velikosti přesahující zvolenou velikost expozičního pole, může být dosaženo dělením grafického motivu na pole tvaru obecného, viz. obr. 7.7.



Obr. 7.7 Rozdíl rušivého dojmu na ploše dělené na čtverce a dělené obecně

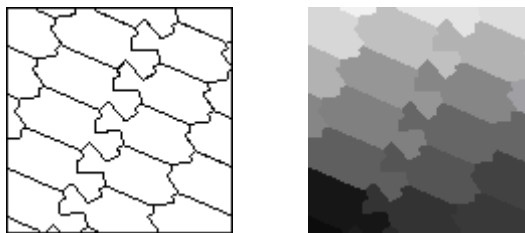
Postup dělení grafického motivu na pole obecného tvaru je dále v textu rozdělen na pět kroků. Všechny popsané kroky postupu s výjimkou prvního byly automatizovány použitím programovacího prostředí Matlab.

Prvním krokem postupu je návrh motivu masky. Masku se musí skládat z polí menších než maximální technologicky povolená velikost expozičního pole, nejlépe však z polí velikosti co možná nejbližší kalibračnímu motivu, pro snížení pravděpodobnosti vzniku zkreslení. Ze stejného důvodu je vhodné navrhovat tvar jednotlivých expozičních polí co možná nejbližší čtvercovým. Masku expozičních polí je vhodné navrhovat ve vektorovém grafickém formátu, který umožňuje export do bodových grafických formátů ve zvolených rozlišeních.

Vektorové masky vyexportované do černobílých bitmap s čarami bodové tloušťky je nutno převést na matice hodnot

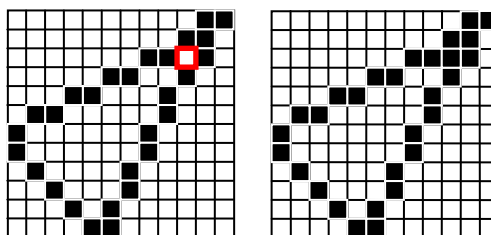
1. popisující polohu a velikost hranic jednotlivých expozičních polí a
2. vlastní motivy expozičních polí masky.

Druhým krokem postupu dělení grafického motivu na obecně ohraničená expoziční pole je převod masky na matice, viz. obr. 7.8, a je založen na vyhledání souvislých ploch, které mají být exponovány.



Obr. 7.8 Maska po převedení na vstupní data a motivy expozičních polí

Protože velikosti *makropixelu* při použití maticového přístupu vyplňování dat mohou dosahovat velikostí, které jsou pod lupou viditelné, je vhodné exponovat i hranice masky. Algoritmus pro vyhledání souvislých ploch pozadí ověřuje, mají-li horizontálně a vertikálně sousedící body stejnou hodnotu. Je-li sousedícím bodem hranice, je přijata jako součást maskovaného motivu a je ověřeno, jsou-li i nejbližší horizontálně, vertikálně i diagonálně sousedící body součástí hranice, což umožňuje expozici hranic masky silnějších než jeden bod. Převod samostatných bodů pozadí na body hranic, vyjádřený obr. 7.9, se stává řešením pro odstranění zbytečných pojezdů stolů. Již v tomto kroku je možno zvolit pořadí expozice jednotlivých expozičních polí. Je jím pořadí hodnot v poli popisujícím velikost hranic jednotlivých expozičních polí, kterým odpovídají použité barvy polí masky.

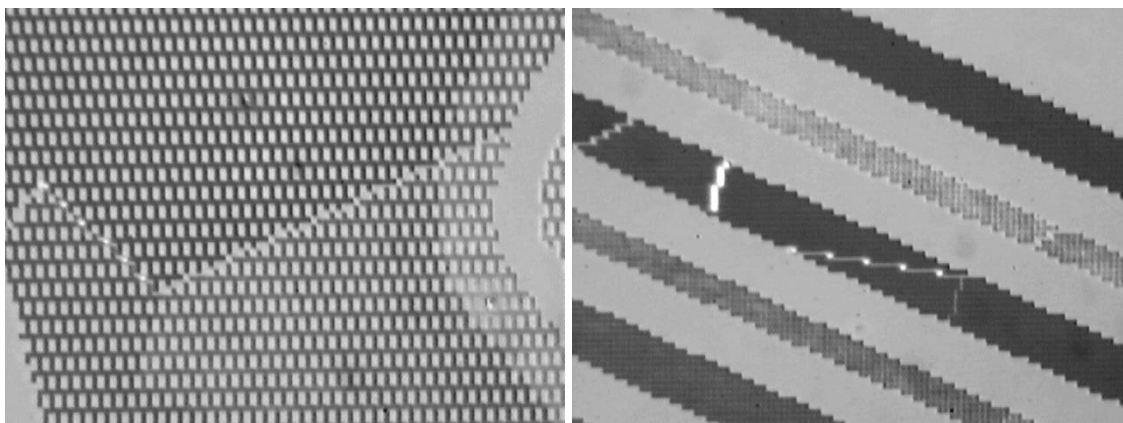


Obr. 7.9 Převod samostatných bodů pozadí na body hranic

Třetím krokem postupu je kontrola a změna pořadí expozice jednotlivých expozičních polí v případě potřeby. Pořadí jednotlivých expozic určuje vazební soubor, který je vytvářen v pátém kroku postupu. Je vhodné provést kontrolu i změnu pořadí expozic jednotlivých expozičních polí již po vytvoření matice popisující polohu a velikost hranic jednotlivých expozičních polí. Výhodou je především možnost vizuální kontroly pořadí jednotlivých expozičních polí bez nutnosti simulace expozice.

Čtvrtým krokem postupu je vlastní dělení skládající se z výběru obdélníkových oblastí těsně ohraničujících vybrané expoziční pole v poli masky a poli motivu. Vybraná část pole masky je převedena na binární tak, aby hodnota části, kterou chceme exponovat, byla jedna. Binární maskou je pak vynásoben požadovaný motiv.

Pátým krokem je vytvoření vazebního souboru popisujícího mimo jiné pořadí expozice jednotlivých expozičních polí, který se skládá převážně z příkazů pojezdů stolů a příkazů určujících polohu počátku souřadnicové soustavy pro příkazy vlastní expozice. Expoziční pole je kalibrováno vzhledem ke středu vychylovací soustavy, umístění exponovaného motivu je proto nejvýhodnější na střed. Velikost jednotlivých expozičních polí se obecně může lišit, proto je zohledňována při určování polohy počátku souřadnicového systému a velikosti pojezdů stolu.



Obr. 7.10 Snímky návaznosti polí realizované masky při zvětšení 50×

Výsledky práce dělení grafického motivu byly publikovány autorem v [47].

7.3 Význam dělení grafického motivu na pole obecného tvaru

Rozšíření elektronového litografu BS600 o možnost čtení obrazu v režimu rastrovacího elektronového mikroskopu přineslo možnost kalibrace expozičního pole před vlastní expozicí i při přerušení expozice v jejím průběhu. Časová náročnost procesu kalibrace expozičního pole elektronového litografu se snížila z hodin na minuty. Pro automatizaci procesu kalibrace byl požadován nástroj, který byl realizován podle zadání operátorů elektronového litografu.

Možnost kalibrace expozičního pole elektronového litografu bezprostředně před expozicí přinesla zvýšení přesnosti návaznosti sousedících expozičních polí.

Homogenita účinnosti difrakce difraktivní struktury se však může lišit i při expozici stejných expozičních dat. Homogenita výsledku expozice odpovídá technickému stavu elektronového litografu, který je obtížné předvídat zejména krátce po výměně katody. Požadavek na průmyslovou produkci zakázek aktuální technický stav elektronového litografu nezohledňuje, a proto byla hledána jiná řešení. Rozdělení expozice na expoziční pole obecného tvaru se stalo řešením umožňujícím nepřerušit produkci po výměně katody, kdy nová katoda není ještě dostatečně stabilní a vykazuje fluktuace proudové hustoty.

Dělení motivu expozice je nutné pro souvislé plochy difraktující světlo pod jedním úhlem. Návrhář grafického motivu může využít dělení na expoziční pole obecného tvaru pro podporu motivu obrazu, je však nutné vytvořit doplňkový návrh masky pro dělení na jednotlivá expoziční pole obecného tvaru, který bude odlišný pro každý jednotlivý případ. Postup návrhu masky je dostupný v literatuře [24].

8 Závěr

Závěrem se pokusíme shrnout vlastní přínos a význam této práce při návrhu a realizaci reliéfních difrakčních struktur a optických elementů připravovaných pomocí elektronové litografie s tvarovaným svazkem.

Difrakční účinnost difrakčních mřížek se zvýšila především díky možnosti přizpůsobení dat expozice technologickým požadavkům. Přesnost dodržení úhlů natočení požadovaných difrakčních mřížek se oproti původně používaným technikám zvýšila jak pro maticový, tak i pro obecný přístup expozice dat.

Pro kombinaci většího počtu difrakčních mřížek v jednom místě plochy byl navržen algoritmus provádějící kontrolu vzájemné vzdálenosti bodů kontrolovaného motivu umístěných náhodným generátorem. Přístup generování náhodného rozložení s dostatečnou homogenitou zaplnění a jednotným rozdělením plochy pro jednotlivé mřížky úspěšně nahradil maticový přístup umístování většího počtu difrakčních mřížek v jednom místě plochy.

Algoritmus pro převod obecných struktur byl použit pro převod nedifrakčních struktur [46] i počítačem generovaných hologramů [48]. Nové možnosti v oblasti počítačem generovaných hologramů vyvolaly nutnost rozvoje v oblasti úpravy požadovaného difrakčního obrazu. Dalším úspěchem byla realizace převodníku požadovaného difrakčního obrazu na difrakční strukturu dle [20] [21] [22].

Algoritmus pro generování dat zonálních struktur umožnil požadovanou tvorbu expozičních dat před vlastní expozicí (přístup *off-line*), tento přístup umožnil dělení motivu do expozičních polí a oken a které výsledně výrazně zvýšilo rychlost expozice. Novými implementovanými možnostmi jsou vyhodnocení použití elementární expozice po porovnání s grafickým motivem a úprava vypočtené pozice elementární expozice dle zadaných rovnic.

Prostředí pro kalibraci umožňující využití elektronového litografu v režimu rastrovacího elektronového založené především na usnadnění vyhodnocování snímaných dat a automatizaci celého procesu [45] přineslo výrazné zrychlení celého procesu kalibrace vychylovacího pole elektronového litografu i zvýšení její přesnosti.

Aplikaci algoritmu pro dělení realizované grafiky na expoziční pole obecného tvaru [47] bylo dosaženo snížení viditelnosti jednotlivých expozičních polí ve srovnání s dělením na pole čtvercová. Aplikace algoritmu měla význam především po výměně katody, kdy byla homogenita plochy expozičního pole pokrytého stejným motivem nízká.

Další rozvoj elektronového litografu BS600 se zaměřil směrem popsaným ve [49]. Hardwarové změny otevírají nové možnosti pro výzkum a vývoj v oblasti elektronové litografie a jejím využití pro realizaci reliéfních difraktivních struktur.

Pro udržení konzistence práce nejsou některé publikované aktivity v práci uvedeny, např. [44]. Celkově je možno říci, že práce v laboratoři EBL v průběhu doktorského studia byla přínosná.

9 Použitá literatura

- [1] van Renesse, R. L., "Optical Document Security", Artech House, London, *third edition*, 366 pages, 2005. (ISBN 1-58053-258-6)
- [2] Ryzi, Z., *et al.*, "Optical Device and Method of Manufacture", Optaglio Ltd., patent WO 03 009225, filed July 16, 2002, published January 30, 2003.
- [3] Lee, R. A., "The Pixelgram – an Application of Electron Beam Lithography for the Security Printing Industry", SPIE Vol. 1509 Holographic Optical Security Systems, The Hague, Netherlands, March 14-15, 1991, pp. 48-54.
- [4] Kotačka, L., *et al.*, "Synthetic Holography at 500000 dpi: from Renaissance of Portraits to Holographic Dust", The 2008 Conference on Optical Security and Counterfeit Deterrence, 23–25 January 2008, San Francisco, California, paper 26, 13 pages, 2008.
- [5] Schilling, A., Tompkin, W. R., "Diffractive OVDs for Window Features in Banknotes", *idem*, paper 22, 14 pages, 2008.
- [6] Despland, C. A., *et al.*, "Creation of Novel Security Features Using Optically Variable Magnetic Inks", *idem*, paper 20, 10 pages, 2008.
- [7] Raksha, V., *et al.*, "Printable Appearance-Changing Graphical Security Devices", *idem*, paper 14, 15 pages, 2008.
- [8] Braginet, E. *et al.*, "Complex Computer-Synthesised Holograms Forming Uncaused Fields", *idem*, paper 23, 8 pages, 2008.
- [9] Ohala, J., "Visual Effect Created by an Array of Reflective Facets with Controlled Slopes", patent WO 90 08338, filed December 26, 1989, published July 26, 1990.
- [10] Ryží, Z., "Způsob vytvoření trojrozměrného obrazu, difraktivní prvek a způsob jeho vytvoření", Optaglio s.r.o., vynález CZ-2004-869, přihlášeno 6.8.2004, zveřejněno 15.3.2006.
- [11] Ryží, Z., *et al.*, "A Method of Creating Three-Dimensional Image, a Diffractive Element and a Method of Creating the Same", Optaglio s.r.o., patent WO 06 013215, filed August 8, 2005, published February 9, 2006.
- [12] Tompkin, W. R., Schilling, A., "Layer Arrangement Provided with a Structure Producing a Diffractive Optical Effect and a Lens-Type Effect", OVD Kinegram AG, patent WO 04 049250, filed November 7, 2003, published June 8, 2004.

- [13] Gajda, R., Stepien, P., "Optically Variable Device (OVD) and a Method of Recording OVD and an OVD Recorder", WO 97 16772, filed October 29, 1996, published May 9, 1997.
- [14] Halíček, M., "Vyhodnocení difrakční účinnosti optických mřížek", FEI VUT Brno, 2000. [Diplomová práce]
- [15] Gavenda, R., "Program pro přípravu dat rozměrných struktur". [Bakalářská práce]
- [16] Kolektiv autorů, "Elektronový litograf BS 600 a jeho technologické aplikace", Ústav přístrojové techniky ČSAV, SÚZ, 1989.
- [17] Vašina, J.: "Popis příkazů programu EXPO V1.6", Eltek spol.s r.o., *Manuál programu Expo*, 2004.
- [18] Vašina, J.: "Popis struktury binárních dat", *Manuál programu Expo.NET*, 2006.
- [19] Kolařík, V., "Datové toky okolo litografu BS 600", VUT v Brně, Brno 2002 [Habilitační práce]
- [20] Škereň, M., Richter, I., and Fiala, P., "Iterative Fourier transform algorithm: comparison of various approaches", *J. Mod. Opt.* 49 (11), 1851–1870 (2002).
- [21] Škereň, M., Richter, I., and Fiala, P., "Design of binary phase-only diffractive optical elements for laser beam shaping", pp. 154-164. *Laser beam shaping, Proc. SPIE Vol. 4095* (2000).
- [22] Škereň, M., Richter, I., and Fiala, P., "Laser beam shaping by binary and multi-level phase-only diffractive optical elements", *Laser beam shaping II, Proc. SPIE Vol. 4443*, 2001. (0277-786X ISSN)
- [23] Fedor, A., "Binary Optic Diffuser Design", *Proc. SPIE Vol. 4557*, pp. 378-385, *Micromachining and Micro fabrication Process Technology VII*, 2001
- [24] Escher, M. C., "Vision of Symmetry", China, ISBN 0-500-51169-1
- [25] "Zařízení pro zhotovení opticky variabilních difraktivních struktur", ČVUT FJFI a Lightgate a.s., patent CZ 2001-12094, přihlášeno 15.6.2001, zveřejněno 12.9.2001.
- [26] Laakkonen, P. *et al.*, "Electron-Beam-Fabricated Asymmetric Transmission Gratings for Microspectroscopy", *Applied Optics*, Vol. 39, No. 19, 1 July 2000, pp. 3187-3191.
- [27] Steenblik, R.A., and Hurt, M.J., "Apparatus for Providing Autostereoscopic and Dynamic Images and Method of Manufacturing Same", *Applied Physics Research, L.P.*, U.S. patent 5,568,313, filed March 2, 1994, published October 22, 1996.

- [28] Tompkin, W.R., and Staub, R., "Machine-Verifiable Diffractive Features for Document Security", in Proc. of SPIE Conference on Optical Security and Counterfeit Deterrence Techniques II, Vol. 3314, San Jose, CA, January 28-30, 1998, pp. 203-213.
- [29] Souparis, H., and Daniel, F., "Method for the Production of an Optically Variable Image", Hologram Industries, patent WO 95 23986, filed March 3, published September 8, 1995.
- [30] Staub, R., *et al.*, "Combination Gratings", Proc. of the SPIE Conference on Diffractive and Holographic Optics Technology III, Vol. 2689, San Jose, CA, 1996, pp. 292-299.
- [31] van Renesse, R.L., "Security Aspects of Commercially Available Dot Matrix and Image Matrix Origination Systems", Proc. International SPIE Conference on Optical Holography and Its Application, Kiev, Ukraine, May 24-26, 2004.
- [32] Kyser, D.F., and Viswanathan, N.S., "Monte Carlo Simulation of Spatially Distributed Beams in Electron-Beam Lithography", *Journa Vac. Sci Technol.*, Vol. 12, No 6, Nov./Dec. 1975, pp. 1305-1308.
- [33] Kyser, D.F., and Pyle, R., "Computer Simulation of Electron-Beam Resist Profile", *IBM J. Res Develop.*, Vol. 24, No. 4, July 1980, pp. 426-437.
- [34] Owen, G., "Methods for Proximity Effect Correction in Electron Lithography", *J. Vac. Sci. Technol. B* 8 (6), Nov/Dec 1990, pp. 1889-1892.
- [35] Seo, E., *et al.*, "Determination of Proximity Effect Parameters and The Shape Bias Parameter in Electron Beam Lithography", Elsevier Science B.V., *Microelectronic Engineering* 53 (2000), pp. 305-308.
- [36] van Renesse, R.L., "Ordering The Order - A Survey of Optical Document Security Features", SPIE Vol. 2406, 1995, pp. 268-275. (ISBN 0-8194-1753-X)
- [37] Babin, S. *et al.*, "Comprehensive Simulation of Electron-Beam Lithography Process Using PROLITH/3D and TEMPTATION Software Tools", Elsevier Science B.V., *Microelectronic Engineering*, 57-58 (2001), pp. 343-348. (ISSN 0167-9317)
- [38] Matějka, F., *et al.*, "Reducing the Size of a Rectangular-Shaped Electron Beam in E-Beam Writing System", Proc. of the 8th Multinational Congress on Microscopy. Prague : Czechoslovak Microscopy Society, 2007, s. 87-88. (ISBN 978-80-239-9397-4)
- [39] Matějka, F., "Fabrication of Multilevel Diffractive Optical Elements using Electron Beam Lithography", Proc. of the 9th International Workshop on Applied Physics of Condensed Matter. Žilina: FEE University of Žilina, 2003, s. 241 - 244. (ISBN 80-8070-088-5)

- [40] Matějka, F., a Ryzí, Z, "Electron Beam Lithography - a Tool for Nanotechnologies?", Proc. of Nano '02 - national conference. Praha: Czech Society for New Materials, 2002, s. 28. (ISBN 80-7204-258-0)
- [41] Matějka, F., and Matějková, J., "Optimisation of Reliefs of Thin Polymer Films of Resist for Phase Diffractive Optical Elements", Proc. of Electronic Devices and Systems Y2K - Intensive Training Programme in Electronic System Design - Workshop. Brno: Technical University Brno, 2000 - (Musil, V.) s. 199-201. (ISBN 80-214-1780-3)
- [42] Kolařík, V., *et al.*, "Towards the sub-100nm E-Beam Writing System", NANO '05. Abstract booklet. Brno: Vysoké učení technické, 2005, s. 116. (ISBN 80-214-3044-3)
- [43] Kolařík, V. *et al.*, "Temperature Monitoring of the EBL Facility" Electronic devices and systems 02 - proceedings. Experimental methods in acoustic and electromagnetic emission. Brno: VUT, 2002 - (Musil, V.), s. 207 - 210. (ISBN 80-214-2180-0)

10 Vlastní práce autora

- [44] Daněk, L., "Methods Used to Determine Exposition Curve for Diffractive Relief", Brno, 2003, 80-214-2379-X
- [45] Daněk, L., "Lukáš Daněk: Calibration of the Deflection Field of the Lithograph Using SEM Mode", Brno, 2004, 80-239-2268-8
- [46] Daněk, L., "Non-diffractive submicron structures forming on electron beam lithograph BS601", Portorož, Slovenia, 2005, ISBN 961-6303-69-4
- [47] Daněk, L., "A tool for division of exposition to sections of non-rectangular shape", Brno, 2005, 80-214-2888-0
- [48] Daněk, L., "Algorithms for conversion of diffractive structures into exposition data", Brno, 2005, 80-214-2888-0
- [49] Kolařík, V., *a kol.*, "Zápis tvarovaným elektronovým svazkem", *Jemná mechanika a optika*, ročník 53, č. 1 (2008), s. 11-16. (ISSN 0447-6441)
- [50] Kotačka, L., *et al.*, "Optical Security Device Offering 2D images", Optaglio s.r.o., patent WO 07 063137, filed December 1, 2006, published June 7, 2007.

Kontrolní seznam rovnic.

(4.1) mřížková rovnice.....	13
(4.2) rovnice přímky	16
(4.3) směrnice přímky	16
(4.4) posuv přímky	17
(4.5) poloha bodu v obrazu difrakce.....	17
(5.1) poloha bodů v difrakčním obrazu.....	28
(5.2) vzdálenost bodů v difrakčním obrazu.....	28
(7.1) kalibrace elektronového litografu úpravou napětí vychylovacích cívek	47
(7.2) kalibrační koeficient	47
(7.3) diskrétní Fourierova transformace	48
(7.4) dvourozměrná diskrétní Fourierova transformace	49
(7.5) zpětná dvourozměrná diskrétní Fourierova transformace	49

Kontrolní seznam obrázků.

Obr. 4.1	difrakční mřížka.....	13
Obr. 4.2	binární difrakční mřížka	13
Obr. 4.3	Model používaný při návrhu mřížek	13
Obr. 4.4	Profil mřížky změřený mikroskopem atomárních sil.....	15
Obr. 4.5	Vygenerovaná mřížka a rekonstrukce obrazu difrakce.....	17
Obr. 4.6	Simulace výstupů algoritmů pro generování mřížek pro maticový přístup.....	18
Obr. 4.7	Difrakční mřížka získaná Fourierovou transformací difrakčního obrazu a zpětná rekonstrukce obrazu	18
Obr. 4.8	Mřížka z obr. 4.5 převedená na expoziční data 1:1	19
Obr. 4.9	Simulace dat difrakční mřížky zvolených difrakčních parametrů	20
Obr. 4.10	Závislost difrakční účinnosti na hloubce mřížky s obdélníkovým profilem.....	21
Obr. 4.11	Difrakční účinnost mřížky v závislosti na zaplnění plochy.....	22
Obr. 4.12	Návaznost mřížek generovaných pro maticový přístup expozice dat..	23
Obr. 4.13	Návaznost rozvoje mřížek s periodou 1,25 μ m a krokem 3°	24
Obr. 4.14	Matice devíti náhodně rozmístěných mřížek a tři z masek.....	25
Obr. 4.15	Porovnání maticového a náhodného rozmístění mřížek.....	26
Obr. 5.1	Úprava vzorového obrazu pro převod.....	29
Obr. 5.2	Úprava požadovaného obrazu pro převod.....	29
Obr. 5.3	Algoritmus pro převod bitmap skládajících se z téměř rovných čar	31
Obr. 5.4	Algoritmus pro převod obecných bitmap (difraktivních struktur).....	32
Obr. 5.5	Simulace výstupů algoritmu dva po eliminaci a tři.....	33
Obr. 5.6	Ukázka nesymetrického obrazu difrakce	34
Obr. 5.7	Plocha vyplněná šterbinovou mřížkou	35
Obr. 5.8	Porovnání dat maticového rozmístění se syntetickým hologramem	36
Obr. 5.9	Difrakce na maticově umístěných mřížkách a syntetickém hologramu	37
Obr. 5.10	Porovnání dat maticového rozmístění se syntetickým hologramem	37
Obr. 5.11	Obrázky z elektronového mikroskopu ve zvětšení 3.000 a 10.000.....	38
Obr. 6.1	Příklady odvození zonálních struktur	39
Obr. 6.2	Mezikruží (KRU) a kružnice (KRT), jeden kvadrant; poloměry mezikruží 20 a 30 mikronů, poloměry kružnice 24 a 25 mikronů.....	41
Obr. 6.3	Zonální čočka (LEN) a zonální kužel (SOE), jeden kvadrant; parametry čočky: poloměr 30 μ m, ohnisko 30 μ m (λ 550 nm), parametry kužele: poloměr 30 μ m, rozteč čar 1.2 μ m.	41
Obr. 6.4	Ukázka výstupu algoritmu pro generování zonálních struktur	44
Obr. 7.1	Typy analyzovaných značek (zleva: stolová, křížová a rámečková) ...	48
Obr. 7.2	Ukázka práce filtrů na značkách představených na obr. 7.1 stolové a) vstup b) výstup filtru a rámečkové c) vstup d) výstup filtru	50
Obr. 7.3	Analýza obrazu značky a vykreslené odchylky.	51
Obr. 7.4	Vliv rozdílu vzdálenosti substrátu a značek od roviny vychylovacích cívek na výchylku	52
Obr. 7.5	Naexponované obrazce pro hodnocení kvality kalibrace. Nezkalibrované expoziční pole vlevo a zkalibrované vpravo.....	53
Obr. 7.6	Standardní způsob dělení a navazování expozičních polí.....	54
Obr. 7.7	Rozdíl rušivého dojmu na ploše dělené na čtverce a dělené obecně....	54
Obr. 7.8	Maska po převedení na vstupní data a motivy expozičních polí	55

Obr. 7.9	Převod samostatných bodů pozadí na body hranic.....	55
Obr. 7.10	Snímky návaznosti polí realizované masky při zvětšení 50×.....	56

Curriculum Vitae

Jméno: Ing. Lukáš Daněk

Narozen: 14.2.1979

Kontakt: danekl@feec.vutbr.cz

Vzdělání

Vysoké učení technické v Brně

Praxe

Výuka na UMEL, vývoj v EBL AVČR v Brně, příprava dat pro BS601 pro společnosti Optaglio s.r.o., zaměstnání společností Vigour s.r.o.

Projekty

FRVŠ, 2004, G1, Sada difraktivních vzorků

Účast na řešení projektů

GAAV S2065014 "Reliéfní submikronové difraktivní stuktury" (řešeno v letech 2000-2002)

projekt GAČR 102/05/2325 "Elektronová litografie pro přípravu nanostruktur" (řešeno v letech 2005-2006)

výzkumný záměr ÚPT AV ČR "Rozvoj experimentálních metod studia fyzikálních vlastností hmoty a jejich aplikací v pokročilých technologiích" AVO Z20650511 (1999-2003 a 2004-dosud), interní vědecké projekty ÚPT "Difraktivní optické struktury" otevřené v rámci smlouvy o spolupráci (1996-2008) mezi ÚPT AV ČR (od 1. 1. 2007 ÚPT AV ČR v.v.i.) a Czech Holography s.r.o. (od roku 2000 Optaglio s.r.o.).

Další aktivity

Vývoj software pro přijímání a zpracování dat zasílaných HW, vyvíjeným pro Corrosion centre in Manchester, jejich zobrazování a řízení průběhu měření.