

Oponentní posudek disertační práce

Uchazeč: Ing. Stanislav Krátký

Název disertační práce: Kombinovaná elektronová litografie

Oponent: Ing. Marek Škereň, Ph.D.

Pracoviště opONENTA: IQS Group s.r.o.

Oponent se v posudku vyjádří dle Studijního a zkušebního řádu VUT zejména:

- a) k aktuálnosti tématu disertační práce,*
 - b) zda disertační práce splnila stanovený cíl,*
 - c) k postupu řešení problému a k výsledkům disertační práce s uvedením konkrétního přínosu doktoranda,*
 - d) k významu pro praxi nebo rozvoj oboru,*
 - e) k formální úpravě disertační práce a její jazykové úrovni,*
 - f) zda disertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona,*
 - g) zda student prokázal nebo neprokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu a zda práce splňuje nebo nesplňuje požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru. Bez tohoto závěru je posudek neplatný.*
- Ke každému z níže uvedených bodů je nutno doplnit stručný komentář.*

Ad a) Aktuálnost tématu disertační práce

Téma disertační práce je velmi aktuální.

Komentář:

Předložená disertační práce se zabývá problematikou využití elektronové litografie v oblasti realizace optických difrakčních struktur. Některé požadavky optických prvků se ale liší od požadavků polovodičového průmyslu, který je stále ještě dominantním polem aplikace elektronové litografie. Optické prvky vyžadují podstatně větší hloubku reliéfu (typicky alespoň stovky nanometrů, často ale také jednotky až desítky mikrometrů) a zejména pak spojitý průběh profilu reliéfu (resp. víceúrovňový profil). Adaptace procesů přípravy dat, expozice a poexpozičního zpracování s ohledem na tato specifika je proto nezbytným předpokladem úspěšného využití elektronové litografie v oblasti sofistikovaných difraktivních struktur.

S rychlým rozvojem aplikací optických mikrostruktur roste poptávka po precizních, efektivních a spolehlivých technikách jejich realizace. Elektronová litografie je jednou z mála technik, které dokážou naplnit požadavky na vysoké rozlišení, nicméně její nasazení je stále ještě limitováno výše zmíněnými

problémy, a také časovou náročností nejenom samotné expozice, ale i procesu datové přípravy. Jinými slovy, pro širší využití elektronové litografie v předmětných oblastech optických aplikací je nezbytné zvládnout proces zápisu a zpracování hlubokých reliéfů se spojeným průběhem profilu, a to při zachování akceptovatelné časové náročnosti procesů. Je přitom potřeba zohlednit skutečnost, že reliéfní profil může být také plně aperiodický a jeho datová interpretace může být netriviální (zejména v kombinaci s velkou plochou prvku a extrémními detaily struktury). Předložená disertační práce je zaměřena právě na tyto klíčové problémy a s nimi související témata, jako jsou příprava vhodného záznamového materiálu, praktické aspekty zpracování dat a další. Proto jsou její téma a cíle dle mého názoru velmi aktuální a práce tak může přispět k posunu ve využívání litografických technik v moderních optických aplikacích.

Tři hlavní cíle disertační práce jsou zaměřeny na důležité aspekty realizace optických mikrostruktur s využitím elektronové litografie. Kombinace různých systémů zápisu má potenciál zvýšit efektivitu procesu s ohledem na specifické parametry optických prvků, optimalizace datové přípravy míří na jejich datovou komplexnost a technika zápisu hlubokých víceúrovňových struktur je z fyzikálního hlediska pro řadu důležitých optických aplikací nezbytností.

Ad b) Splnění stanoveného cíle disertační práce

Cíl disertační práce byl splněn.

Komentář:

Domnívám se, že cíle disertační práce, tak jak byly formulovány v kapitole 2, byly naplněny:

- Byla demonstrována technika kombinované elektronové litografie využívající dvou různých systémů pro zápis na jediném substrátu,
- byly důkladně analyzovány možnosti zrychlení zpracování expozičních dat technikou modifikace hranic objektů, tato technika byla experimentálně demonstrována a byla provedena hloubková analýza dopadu datové optimalizace na optickou funkci realizovaných struktur,
- byla navržena a experimentálně demonstrována technika frézovaného zápisu hlubokých optických struktur do bloku plexiskla, která elegantně odstraňuje některé nedostatky konvenčních přístupů.

Kromě toho práce obsahuje řadu dalších zajímavých výsledků, které jistě naleznou široké využití při řešení problémů týkajících se přímého litografického zápisu optických mikrostruktur fokusovaným elektronovým svazkem.

Ad c) Postup řešení problému a výsledky disertační práce s uvedením konkrétního přínosu doktoranda

Postup řešení problému a výsledky disertační práce jsou vynikající.

Komentář:

Postup řešení problematiky v disertační práci je logický a v každém ohledu směřuje k naplnění stanovených cílů. Z popisu jednotlivých kroků je zřejmé, že doktorand narazil v průběhu řešení na řadu praktických problémů, které dokázal správně identifikovat, navrhnout jejich řešení a toto řešení i realizovat. Z částí věnovaných diskusi dílčích výsledků je patrné, že doktorand má v dané oblasti nadhled a dokáže dosažené výsledky uvést do širších souvislostí. Zejména je ale potřebné vyzdvihnout pečlivost přístupu ve všech ohledech a experimentální komplexnost celé práce. I když to není vždy na první pohled jasně viditelné, je zřejmé, že za celou práci je obrovské množství experimentální práce v oblasti přípravy materiálů, samotných expozic, jejich poexpozičního zpracování a zejména následné analýzy. Ucelenost a vzájemná korespondence jednotlivých výsledků jistě vyžadovaly nemalé úsilí, které ocení každý, kdo má s předmětnou problematikou praktické zkušenosti. Oceňuji také široké spektrum experimentálních dat v jednotlivých přílohách práce. Za největší přínos práce považuji kromě navržených nových technik zápisu a optimalizace dat právě důkladnost jejich experimentální demonstrace, která nepochybně přispěje k využití výsledků a dalšímu rozvoji řešené problematiky.

Ad d) Význam pro praxi nebo rozvoj oboru

Význam pro praxi nebo rozvoj oboru je nadprůměrný.

Komentář:

Jak již bylo naznačeno v komentáři Ad a), předložená práce adresuje klíčová témata, která ovlivňují praktické využití elektronové litografie v konkrétních oblastech (realizace difrakčních mikrostruktur pro ochranu dokumentů, realizace optických difrakčních prvků pro tvarování monochromatických a polychromatických světelných svazků). Společnými požadavky v této oblasti jsou realizace velkoplošných prvků (s plochou o velikosti desítek nebo dokonce stovek čtverečných centimetrů), rychlost datové přípravy a expozice (akceptovatelné jsou zde desítky hodin nebo maximálně jednotky dnů), vizuální kvalita (homogenita) struktur a samozřejmě precizní průběh profilu reliéfu. Jak je patrné z předložené práce, navrhované přístupy umožňují v mnoha případech dosáhnout požadované parametry i v případech, kde konvenční přístupy selhávají. Proto se domnívám, že výsledky práce budou mít významný dopad na využití elektronové litografie ve zmíněných oblastech. Navíc, jak sám autor naznačuje v závěru práce, existují možnosti rozvoje navržených postupů, které mají potenciál dalšího zefektivnění jednotlivých procesů.

Ad e) Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň jsou nadprůměrné.

Komentář:

Práce je přehledně členěna, je napsána srozumitelně a s naprosto minimálním množstvím překlepů a jazykových chyb. Drobné nedostatky v sazbě jsou spíše vlastností zvoleného textového editoru a i těch je, s ohledem na rozsah práce, minimální množství. Přiložené ilustrace, grafy a obrázky jsou na vysoké úrovni a přispívají k pochopení diskutované problematiky. Na některých místech textu by bylo možná efektivnější přidat další ilustrace a zjednodušit tak potřebný komentář, nicméně ten je přehledný, a tak jejich absence nemá na celkové porozumění významný dopad. Oceňuji také přesun značné části experimentálních výsledků do příloh, který napomáhá plynulému čtení textu, aniž by byla práce ochuzena o řadu zajímavých výsledků.

Ad f) Disertační práce splňuje podmínky uvedené v § 47 odst. 4 zákona

Disertační práce podmínky uvedené v § 47 odst. 4*) zákona č. 111/1998 sb. o vysokých školách splňuje.

()(4) Studium se řádně ukončuje státní doktorskou zkouškou a obhajobou disertační práce, kterými se prokazuje schopnost a připravenost k samostatné činnosti v oblasti výzkumu nebo vývoje nebo k samostatné teoretické a tvůrčí umělecké činnosti. Disertační práce musí obsahovat původní a uveřejněné výsledky nebo výsledky přijaté k uveřejnění.*

Ad g) Prokázání tvůrčí schopnosti studenta v dané oblasti výzkumu a zda práce splňuje nebo nesplňuje požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru.

Doktorand prokázal tvůrčí schopnosti v dané oblasti výzkumu a práce splňuje požadavky standardně kladené na disertační práce v daném oboru.

Komentář:

Jak již bylo zmíněno v komentáři k předešlým bodům, doktorand prokázal nadhled v daném oboru, schopnost úspěšně řešit zadanou problematiku a tvůrčím způsobem se vypořádat s dílčími problémy, které vyvstávají v průběhu výzkumné práce. Ve spojení s aktuálností tématu, potenciálem využití výsledků výzkumu, a také na základě doložené publikační činnosti doktoranda se jednoznačně domnívám, že doktorand prokázal tvůrčí schopnosti a že předložená práce splňuje požadavky kladené na disertační práce.

Celkové hodnocení:

Disertační práce Ing. Stanislava Krátkého byla vypracována na vysoké úrovni, a to jak po stránce obsahové, tak po stránce formální. Je věnována aktuální problematice a obsahuje nové poznatky a závěry, které budou mít dopad na využívání technik elektronové litografie nejenom v oblasti aplikace reliéfních optických mikrostruktur, ale pravděpodobně i v dalších oblastech moderní vědy a techniky. Práce se opírá o značné množství experimentů, které byly provedeny systematicky a s vysokou pečlivostí a které zvyšují hodnotu prezentovaných závěrů. Doktorand prokázal po všech stránkách schopnost vědecké práce v daném oboru, a proto předloženou práci hodnotím velice kladně a doporučuji ji k obhajobě.

Otázky oponenta:

K předložené práci mám několik dotazů, které by mohl doktorand v rámci obhajoby zodpovědět:

1. V práci se na několika místech vyskytuje pojem intenzity difrakčních řádů (v definicích difrakční účinnosti), která byla vyhodnocována ze simulací, a také měřením v reálném experimentu (například vztahy (7)-(10), (15)-(20)). Bylo by možné objasnit, jak byla intenzita modelována a v jaké geometrii byla měřena? Jaký je vztah této intenzity k veličinám pole příslušných vln?
2. V kapitole 3.2.2 na stránce 63 (viz také obrázek 30) je popsána rekonstrukce signálu z fáze obrazu, můžete blížeji objasnit, jak probíhal výpočet (pro struktury typu BS a také pro struktury typu CGH)?
3. Na stránkách 67-70 je popsáno experimentální vyhodnocení účinností jednotlivých vzorků. Jaká byla geometrie měřícího experimentu? Jaká byla konkrétní perioda resp. nosná frekvence struktur BS-2 a BS-6?
4. Na stránce 68 popisujete zpracování exponovaného vzorku a zmiňujete vyvolání na hloubku rovnající se co nejpřesněji čtvrtině vlnové délky. Proč je taková hloubka optimální? Pokud je struktura s hloubkou $532 \text{ nm} / 4 = 133 \text{ nm}$ pokovena 100 nm Ag jak uvádíte, jaký to má vliv na profil a hloubku reliéfu? Jaká byla míra zaoblení hran reliéfu? Jsou s ohledem na tyto odchylky výsledky v tabulkách 7 a 8 srovnatelné s teoretickými hodnotami z tabulek 5 a 6?

Disertační práci k obhajobě

☒ **doporučuji**

☐ **nedoporučuji.**

Dne: 30.12.2020

Podpis:

