

Ing. Juraj Nevřela

**Využitie nanotechnológií pre výrobu
optoelektronických prvkov s rozmermi
pod difrakčným limitom**

**EXPLOITATION OF NANOTECHNOLOGIES FOR
OPTOELECTRONIC DEVICES FABRICATION WITH
DIMENSIONS UNDER DIFFRACTION LIMIT**

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe: elektronika a fotonika

Miesto a dátum: Bratislava, Máj 2020

Slovenská Technická Univerzita v Bratislave

Fakulta Elektrotechniky a Informatiky

Ústav

Ing. Juraj Nevřela

**Využitie nanotechnológií pre výrobu
optoelektronických prvkov s rozmermi
pod difrakčným limitom**

EXPLOITATION OF NANOTECHNOLOGIES FOR
OPTOELECTRONIC DEVICES FABRICATION WITH
DIMENSIONS UNDER DIFFRACTION LIMIT

Autoreferát dizertačnej práce

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe: elektronika a fotonika

Miesto a dátum: Bratislava, Máj 2020

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Ústave Elektroniky a Fotoniky, FEI STU v Bratislave

Predkladateľ: **Ing. Juraj Nevřela**

Ústav elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. Jaroslav Kováč, PhD.**

Ústav elektroniky a fotoniky, FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **Ing. Gabriel Vanko, PhD.**

Elektrotechnický ústav,
Slovenská akadémia vied
Dúbravská cesta 9, 845 07 Bratislava

prof. Mgr. Ivan Martinček, PhD.

Katedra fyziky, Elektrotechnická fakulta
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 1, 010 26 Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa, o hod. na
Fakulte Elektrotechniky a Informatiky, Slovenskej Technickej
Univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava.

Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec
Dekan FEI STU

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Tézy dizertačnej práce	4
3. Dosiahnuté výsledky	5
3.1. Nanášanie fotorezistu	5
3.2. Proces prenosu motívu do rezistu.....	7
3.3. Prenos motívu do substrátu	10
3.4. Vytvorenie pravidelnej štruktúry zárodkov vhodných pre rast usporiadaných nanodrôtov	14
3.5. Numerická analýza štruktúr pripravených pomocou NIL technológie.....	17
4. Záver.....	21
5. Zhrnutie dizertačnej práce	25
6. Summary	26
7. Résumé	27
8. Zoznam publikácií:.....	28

1. Úvod

Posledné dekády boli priamo ovplyvnené rýchlym rozvojom v oblasti mikroelektroniky. Tento rozvoj mal dopad na všetky aspekty každodenného života. Moorov zákon zverejnený v roku 1965, deklaroval každé dva roky zdvojnásobenie integrácie tranzistorov na štvorcový palec. Zvýšenie úrovne integrácie priamoúmerne zvyšuje rýchlosť daného prvku, spoľahlivosť a ďalšie parametre. Zároveň je možné produkovať vyšší počet prvkov za rovnaký

čas, čo úmerne znižuje cenu. Od roku 1965, kedy bol však Moorov zákon zverejnený, úroveň integrácie natoľko pokročila, že rozmery prvkov sa presúvajú do submikrónových oblastí. Tento presun dopomohol k výraznému rozvoju nanotechnológií, ktoré nachádzajú uplatnenie i v oboroch ako je fotonika. Výroba optických prvkov si mnohokrát vyžaduje, aby ich rozmery boli porovnateľné s vlnovou dĺžkou svetla s ktorým pracujú.

Technológie tvarovania sú rozhodujúcimi pri výrobe, či už integrovaných obvodov alebo fotonických prvkov. Optická litografia bola dlhú dobu najvyužívanejšou technológiou v odvetví mikroelektroniky. Avšak vzhľadom na difrakčný limit štandardne využívaných vlnových dĺžok bolo pre dosiahnutie submikrónových rozmerov prístupné k ich znižovaniu. Ako príklad je možné uviesť najpokročilejšiu formu optickej fotolitografie – ponorenú fotolitografiu, využívajúcu vlnovú dĺžku 193 nm, pričom vzduch ako propagačné médium bol nahradený vodou. Touto technológiou je možné vytvárať nanoštruktúry s rozmerom 45 nm, ktoré ešte v roku 2008 predstavovali bežný štandard v polovodičovom priemysle.

Avšak komerčné využívanie malo za následok zvyšovanie technickej náročnosti spojené s vyššími výrobnými nákladmi. Z toho dôvodu je i dnes nadmieru žiadaný vývoj nových tvarovacích technológií, schopných čoraz vyššieho rozlíšenia, pri nízkych výrobných nákladoch. Tieto technológie možno označiť ako litografiu novej generácie (NGL-New Generation Lithography). Do tejto kategórie je možné zaradiť technológie ako napríklad EUV

(z. angl. Extreme UV Lithography), EBL (z. angl. Electron-Beam Lithography) a NIL (Nano-Imprint Lithography).

Prvé použitie EUV litografie je datované od roku 1980 [1]. Jedná sa o modifikáciu optickej litografie, kde použitá vlnová dĺžka klesá na 10 – 14 nm a zároveň je zvýšená numerická apertúra (NA) systému. Pomocou nej je možné dosiahnuť rozlíšenie desiatok nanometrov, avšak stále nie je priemyselne využívaná. Jedným z dôvodov jej nezačlenenia je extrémna zložitosť celého systému a nestabilita fotorezistu.

V 1960, Mollenstedt a Speidel [2] pomocou elektrónového zväzku vytvorili vzor s rozlíšením 20 nm, čím položili základ vzniku EBL. Tento technologický proces vytvára motív v polymérnej vrstve citlivej na elektrónový lúč. Napriek vysokému rozlíšeniu je jej hlavnou nevýhodou prevádzková cena a potreba vysokých expozičných energií [3]. Avšak v priemysle je prevažne využívaná pre tvorbu tieniacich masiek určených pre iné typy litografií využívajúcich žiarenie (napr. optická litografia) alebo „pečiatok“ pre širokú triedu odťahových (imprint) litografií.

Do tejto skupiny patrí aj nanoimprint litografia, ktorá nad inými alternatívnymi metódami vyniká vysokým rozlíšením, rádovo na úrovni 5 nm [4]. Podstatnými benefitmi je široká kompatibilita materiálov, jednoduchosť systému a z toho vyplývajúce nízke prevádzkové náklady. Taktiež je nutné spomenúť, že posledné iterácie tejto technológie dokážu pomocou flexibilných pečiatok na báze Roll-to-Roll výrazne zvýšiť rýchlosť výroby tvarovaných štruktúr. Tak ako každá technológia, aj v prípade NIL môžeme hovoriť o určitých nevýhodách. Vzhľadom na kontaktnú povahu tejto technológie, je nutné spomenúť jej extrémne vysokú citlivosť na častice nachádzajúce sa medzi povrchmi, prípadne na nehomogenitu rezistu. Z toho dôvodu, môže dôjsť nielen k poškodeniu vyrábaného prvku, ale aj použitej pečiatky. Vzhľadom na povahu takýchto defektov je v najhoršom prípade nutné pozastaviť celý výrobný proces.

Problematickou technológiou NIL sa zaoberá aj táto práca počas ktorej bol optimalizovaný technologický proces vytvárania nanoštruktúr. Technologický proces UV NIL je unikátny v krajinách strednej Európy a jeho zvládnutie podmieňuje ďalší rozvoj

nanotechnológií na Slovensku. Dizertačná práca tak predstavuje zavedenie a optimalizáciu komplexného procesu pre prípravu štruktúr s rozlíšením v hlboko submikrónovej oblasti. Takto vytvorené štruktúry z hľadiska dosiahnutých rozmerov, sú jedinečnými v rámci Slovenska a sú vhodné na využitie v optoelektronických a fotonických prvkoch.

2. Tézý dizertačnej práce

1. Získanie nových poznatkov v oblasti tvarovania nízkorozmerných štruktúr s dôrazom na UV nanoimprint litografiu a ich využitie v príprave optoelektronických prvkov

2. Využitie získaných poznatkov na vytvorenie nanoštruktúr pre modifikáciu povrchu vzoriek za účelom zmeny optických vlastností hotových optoelektronických prvkov, alebo ich ďalšieho využitia v technologickom procese.

3. Vyšetrovanie topológie vytvorených nanoštruktúr pomocou moderných meracích metód ako je AFM, SEM a profilometer a ich následná analýza s využitím pokročilého matematického aparátu.

4. Overenie funkčnosti pripravených nanoštruktúr pre optoelektronické prvky dostupnými optickými metódami.

3. Dosiahnuté výsledky

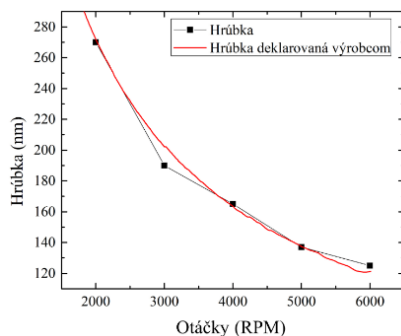
3.1. Nanášanie fotorezistu

Ako fotorezist bol použitý mr-UVCur 21. Jedná sa o tekutý polymérny systém s nízkou viskozitou a vysokou citlivosťou na UV žiarenie (320 – 420 nm). Podľa technickej špecifikácie hrúbka vrstvy má dosahovať 200nm. Táto hrúbka je výrazne vyššia ako výška štruktúr na používaných pečiatkach, čím sa predchádza ich poškodeniu.

Vzhľadom na používanie SiO_2 bol pre zlepšenie adhézie aplikovaný promótor adhézie mr-ASP1. Ten pozostáva z silánových skupín viažucich sa na povrch Si, alebo SiO_2 . Použitie mr-ASP1 prinieslo požadované zvýšenie adhézie a mierne zlepšenie homogenity nanesej vrstvy. Z toho dôvodu bol použitý pri každom aplikovaní na Si/ SiO_2 substráty.

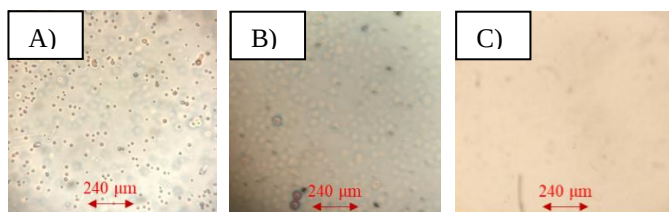
Oba tieto materiály boli nanášané odstred'ovaním, ktorého výhodou je rovnomerné rozloženie hrúbok na celom povrchu substrátu. Odstránenie reziduálnych vrstiev fotorezistu po otlačení a exponovaní je do značnej miery výzva. Bolo preto nutné určiť výšku reziduálnej vrstvy tak, aby jej odstránenie predstavovalo, čo najmenší technologický problém a zároveň nedošlo k priamemu kontaktu pečiatky a povrchu substrátu. Pri takomto kontakte môže dôjsť k nevratnému poškodeniu pečiatky. Ideálne podmienky nanášania týchto vrstiev boli určené pomocou série experimentov, kedy boli systematicky menené parametre nanášania. Počiatočné hodnoty boli získané z technickej špecifikácie. Ako vidno z **Obr. 1** pri použití vyšších otáčok boli dosiahnuté tenšie vrstvy, čo predstavuje výhodu pri použití pečiatok s hrúbkami

od 80 – 100 nm. Zároveň treba poznamenať, že všetky vzorky v tomto experimente boli žihane pri rovnakej teplote a rovnakom čase – 80 °C a 60 s.



Obr. 1: Závislosť hrúbky fotorezistu od použitých otáčok.

Napriek tomu sa deponované vrstvy pred expozíciou vyznačovali vysokou úrovňou nehomogenity, ktorá sa priamo premietla do presnosti meraní hrúbky. Ich rozmery boli rádovo v mikrometroch, ako je možné vidieť aj na **Obr. 2 A), B)**, čo predstavuje prirodzenú prekážku pre vytváranie nanoštruktúr. Bol overovaný aj predpoklad, že dané nehomogenity sú tvorené vzduchovými kapsulami. Z toho dôvodu boli substráty po depozícii vložené na 120 sekúnd do vákuovej komory a po opätovnom vybratí žihané.

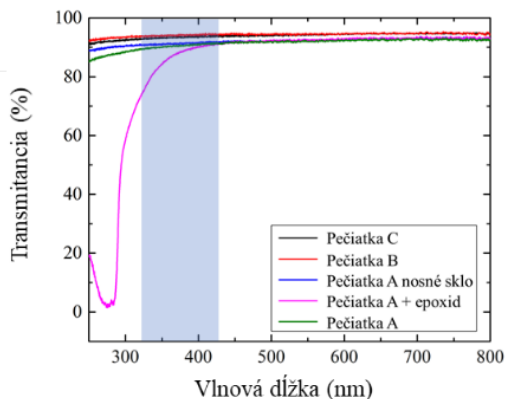


Obr. 2: Nehomogenity fotorezistu na substráte Si + 120nm SiO₂
A) žihanie pri 80°C 1min B) Vzorka vystavená na 120 sekúnd
znižnému tlaku C) Vzorka žihaná pri 90°C jednu minútu

Porovnanie vzorky vytvorenej týmto spôsobom a referenčnej vzorky, ktoré možno vidieť na **Obr. 2 C)**, potvrdzuje túto teóriu. Bolo preto pristúpené k úprave parametrov žihania. Avšak pri zvyšovaní teploty, alebo času žihania bolo nutné prijať kompromis medzi zachovaním elastických vlastností fotorezistu a prípadným znížením výskytu nehomogenít, nakoľko tento prístup sa ukázal ako účinný.

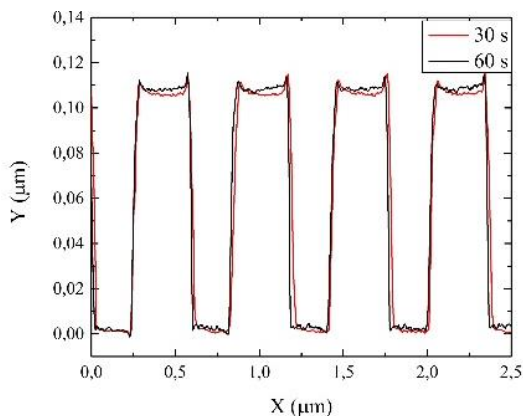
3.2. Proces prenosu motívu do rezistu

Prenos motívu bol realizovaný pomocou MA6BA6 NIL litografu. V rámci experimentov, boli použité tri pečiatky, v práci ďalej označované ako *pečiatka A*, *B* a *C*. Technologický proces nanoimprint litografie bol realizovaný s prihliadnutím na systematickú zmenu viacerých parametrov. V tomto procese je nadmieru dôležité zabezpečiť planparallelitu roviny pečiatky a substrátu. Počas prvotných experimentov bol skúmaný vplyv expozičnej dávky na polymerizáciu rezistu a tým pádom na jeho vytvrdenie. Tieto experimenty boli realizované za použitia *pečiatky A*. Expozičná dávka bola prvotne stanovená z technickej špecifikácie fotorezistu na 800 mW/cm^2 . Avšak vzhľadom na skutočnosť, že vzorky podliehali do 24 hodín zlievaniu v exponovanej oblasti, napriek odporúčanej expozičnej dávke, bolo prístupné k vyšetreniu pečiatky. Po bližšom preskúmaní vyplynulo, že použitý epoxid znižuje transmitanciu *pečiatky A* o 20% pre $\lambda = 320 \text{ nm}$, čo výrazne znižuje celkovú dávku žiarenia absorbovanú v reziste na celej šírke jeho spektrálnej citlivosti (320 – 450 nm), v porovnaní s oblasťami bez epoxidu, alebo *pečiatkou B* a *C* (**Obr. 3**).

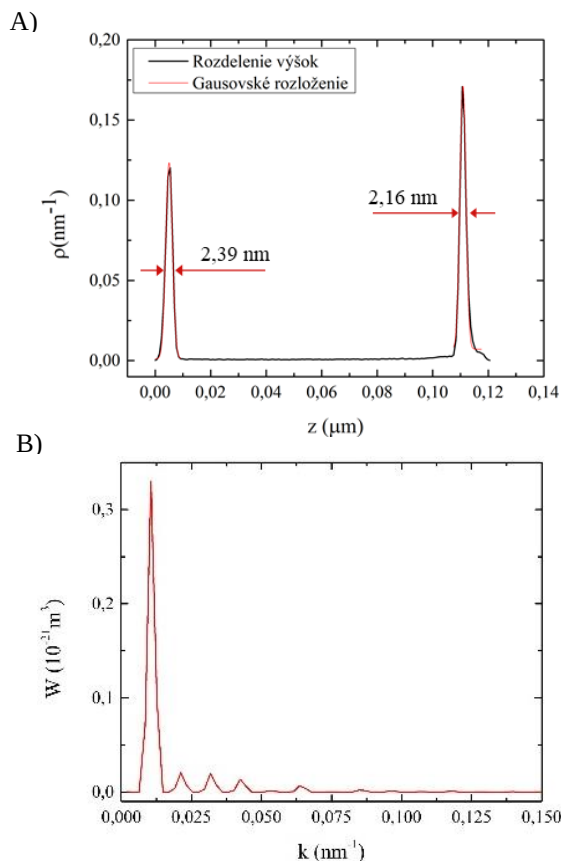


Obr. 3: Transmitancia použitých pečiatok s vyznačeným rozsahom spektrálnej citlivosti fotorezistu

Pri použití *pečiatky A* bola preto vždy používaná výrazne vyššia dávka ako pri ostatných pečiatkach. Skúšané rozsahy pre ostatné pečiatky boli od 700 mW/cm^2 – 1200 mW/cm^2 . Pri voľbe dávok bola zohľadnená aj životnosť použitej expozičnej lampy a pokles jej výkonu. Pri expozičnej dávke od 1000 mW/cm^2 však vzorky ostávali v čase stabilné. Prvé vzorky za použitia *pečiatky A* vykazovali slabú výťažnosť, kedy sa štruktúra nachádzala len na $\sim 15\%$ plochy. Tieto oblasti boli zhodné so zachytenými vzduchovými bublinami v epoxide spojujúcom pečiátku a nosné sklo. Z toho dôvodu boli po prvých experimentoch prevažne využívané *pečiatky B a C*. V ďalšom kroku bol skúmaný vplyv času na kvalitu vyhotovených štruktúr. Bola preto vykonaná séria experimentov, kedy bol čas kontaktu pečiatky s fotorezistom pred expozíciou menený od 30 do 60 s. Ako je vidieť z **Obr. 4**, profily vytvorených štruktúr nevykazujú žiadne významné rozdiely. Tento fakt bol až po experimente potvrdený po prihliadnutí na rovnicu (1), kedy po dosadení všetkých parametrov čas potrebný na vyplnenie všetkých dutín vychádza rádovo v mikrosekundách.



Obr. 4: Priečný rez štruktúrami vyhotovenými aplikovaním rovnakého tlaku po rozdielny čas



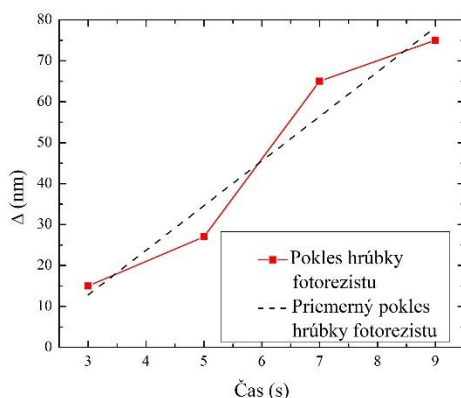
Obr. 5 A) Gaussove rozdelenie výšok daných vzoriek B) Spektrálna výkonová distribučná funkcia vytvorenej štruktúry s periódou 600 nm

Povrchová drsnosť analyzovaná z nameraných hodnôt preukázala, že pri vzorke vyhotovenej za dobu 60 sekúnd dosahovala 2,39 nm na dne vytvorených štruktúr a 2,16 nm na povrchu. Drsnosť bola určovaná štatisticky na základe hodnoty pološírkky Gaussovej funkcie, ktorou bola preložená krivka v miestach oboch maxim **Obr. 5 A)**. Odchýlky od rovnomerného gaussovského rozloženia boli spôsobené nerovnosťami vytvorenými adhéznymi silami pri separácii pečiatky od

fotorezistu. Z vykonanej AFM analýzy bola pomocou fourierovej transformácie štatisticky určená perióda otlaku na 635 nm, čo je zhodné s údajmi dodaných výrobcom (600nm) vid' **Obr. 5 B**).

3.3. Prenos motívu do substrátu

Vytvorené nanoštruktúry boli v ďalšom experimente prenesené z objemu fotorezistu do objemu substrátu, pomocou suchého leptania. Proces prebiehal v dvoch základných krokoch. V prvom kroku, bola odstránená spomínaná reziduálna vrstva fotorezistu. Na realizáciu bol zvolený kyslík ako pracovný plyn pre vytvorenie reaktívneho iónového leptania. Bola vyhotovená séria závislostí rýchlosti leptania od času, kedy ostatné parametre leptania ostávali nemenné. V prvom prípade boli experimenty realizované na fotoreziste exponovanom cez rovné sklo bez nanoštruktúr. Výrazná nehomogenita povrchu rezistu pred leptaním podmienila vytvorenie priemernej hodnoty z viacerých meraní.

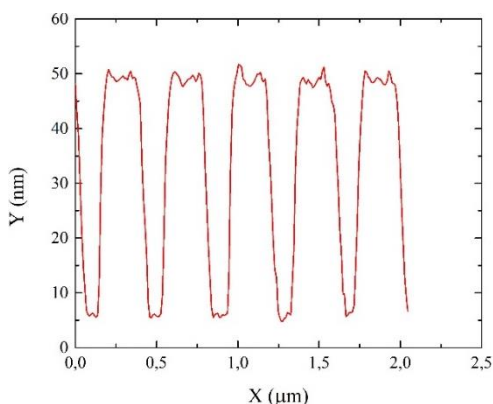


Obr. 6: Závislosť poklesu hrúbky fotorezistu Δ od času leptania pomocou suchého leptania

Na **Obr. 6** možno vidieť priemerné úbytky hrúbky od času leptania vzhľadom k referenčnému, neleptanému povrchu rezistu (115 nm). Po tejto sérii experimentov bolo pristúpené k leptaniu samotného

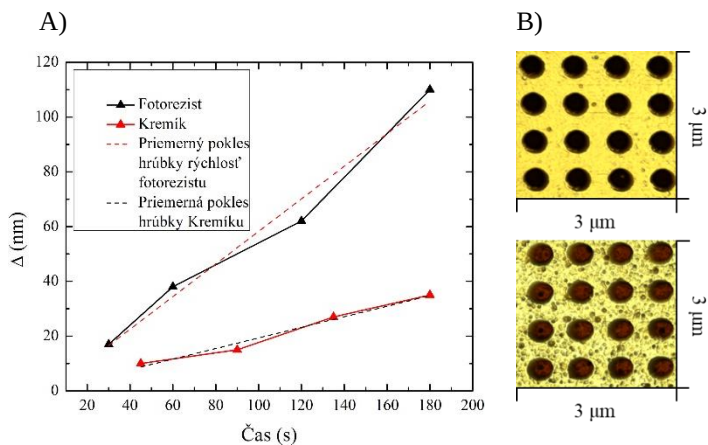
motívu. Pre tieto experimenty bola použitá *pečiatka C*, kde je výška štruktúr stanovená na 50 nm

Z predošlých experimentov bolo možno dedukovať, že pri zvýšených otáčkach odstreďovania a dosiahnutí spomínanej hrúbky fotorezistu v rozsahu 110 – 120 nm by ideálnym časom leptania bolo sedem sekúnd. Hrúbka rezistu, pred vystavením účinkom leptania, bola stanovená pomocou profilometra na 88 nm. Následne hrúbka po leptaní dosahovala len 48 – 53 nm. Prierez dočistených štruktúr v porovnaní s referenčnými neleptanými je znázornený na **Obr. 7**.



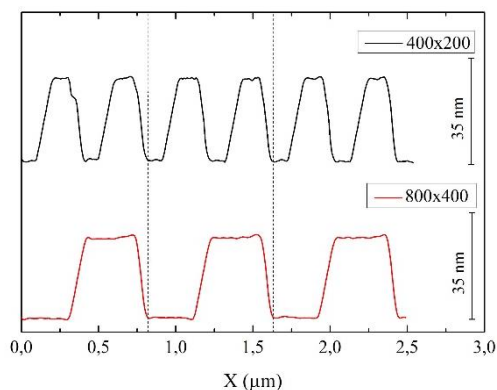
Obr. 7: Priechy rez dočistených štruktúr

Pre dosiahnutie anizotropného leptania substrátu bolo v ďalšom experimente pristúpené k použitiu pracovného plynu SF_6 , avšak výsledné štruktúry boli značne izotropné. Z toho dôvodu bol v ďalších experimentoch použitý pracovný plyn CF_4 . Experimentálne sa preukázali nižšie výkony použité pre tvorbu plazmy, ako efektívnejšie, pri vytváraní podmienok anizotropného leptania. Opäť bola vytvorená závislosť rýchlosti leptania pre fotorezist ako aj kremík. Závislosť zmeny hrúbky od času je znázornená na **Obr. 8 A**). Bolo preukázané, že čas potrebný na odleptanie celej vrstvy fotorezistu je 180 sekúnd. Taktiež bola vypočítaná rýchlosť leptania pre fotorezist 0,59 nm/s (s chybou 0,06) a pre kremík 0,19 nm/s (s chybou 0,02 nm/s) vid' **Obr. 8 A**).



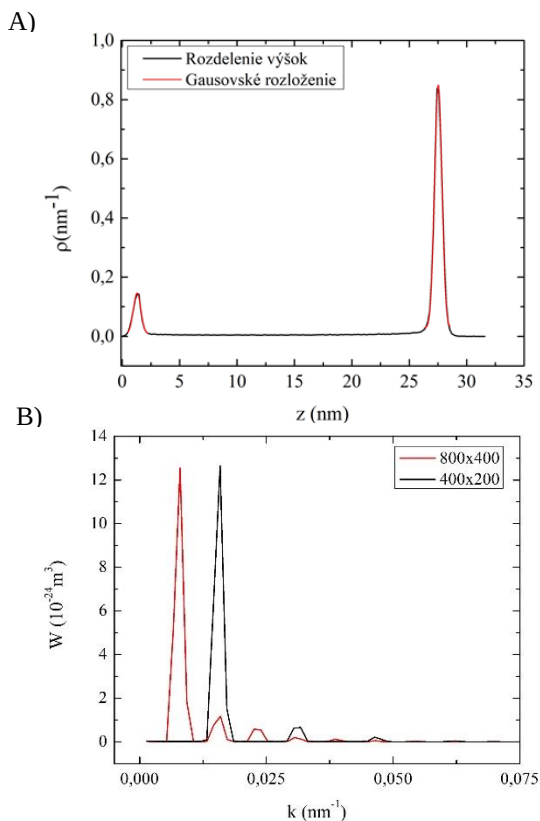
Obr. 8:A) Závislosť poklesu hrúbky fotorezistu Δ a kremíku od času leptania pomocou ICP B) Porovnanie povrchov vzoriek leptaných 6 minút (hore) a 10 minút (dole)

Pre potvrdenie tohto predpokladu bola vyhotovená séria leptaní. Hrúbka fotorezistu na porovnávaných vzorkách, ako aj porovnávané štruktúry boli identické. Výsledné merania preukázali, že vytvorené štruktúry boli izotropné s malým sklonom



Obr. 9: Vybrané pričné rezy štruktúr v objeme Si substrátu

Avšak, bolo taktiež preukázané že predĺženie doby leptani výrazne zhoršuje kvalitu povrchu vid **Obr. 8 B**). **Obr. 9** znázorňuje vybrané priečne rezy štruktúr vystavených leptaniu po dobu 180 sekúnd. Rozdelenie výšok je znázornené na **Obr. 10 A**). Pomocou fourierovej transformácie boli štatisticky určené periódy štruktúr, korešpondujúce s periódami pečiatky (**Obr. 10 B**). Najmenšie vytvorené štruktúry dosahovali šírku ryhy 70 a 90 nm



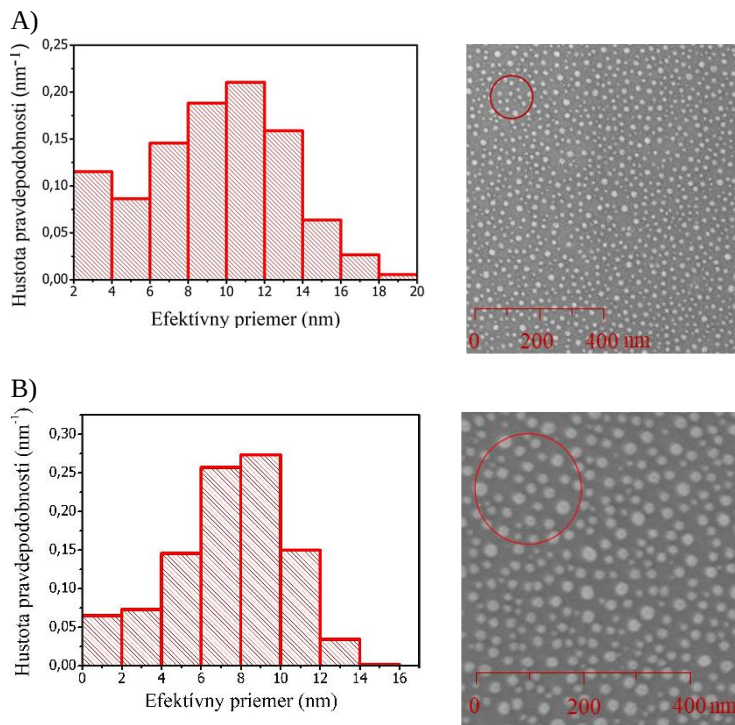
Obr. 10:A) rozdelenie výšok štruktúry s periódou 800 nm preložené Gaussovou funkciou B) Spektrálna výkonová distribučná funkcia povrchu štruktúry

3.4. Vytvorenie pravidelnej štruktúry zárodkov vhodných pre rast usporiadaných nanodrôtov

Takto vytvorené štruktúry so submikrónovou periódou je možné využiť ako masku pre rast usporiadaných gálium fosfidových (GaP) nanodrôtov. Gálium fosfidové nanodrôty v minulosti preukázali svoje výnimočné uplatnenie v elektronike a fotonike. Využitie nachádzajú napríklad v solárnych článkoch [5], tranzistoroch typu FET, alebo rôznych senzoroch. Ich príprava spočíva v nanosení zlatých nanočastíc na povrch GaP (111) na ktorý sú následne rastené GaP nanodrôty využitím technológie MOCVD [5]. Avšak pomocou tohto postupu je možná tvorba len náhodne usporiadaných nanodrôtov. V rámci tohto experimentu bol proces vytvárania štruktúr optimalizovaný pre aplikáciu na GaP substráte.

Výsledné štruktúry boli podrobené štandardnej AFM analýze a ich hĺbka bola 100 nm pri sklone stien približne 87°, čo po prihliadnutí k predošlým experimentom značí dobrú reprodukovateľnosť. Zostatková vrstva fotorezistu bola približne 100nm a dočistenie fotorezistu až po povrch substrátu bolo realizované pomocou už optimalizovaného RIE leptania.

V druhej fáze bol optimalizovaný proces nanášania tenkej vrstvy zlata pomocou fyzikálnej depozície z pár (PVD). Bola pripravená séria vzoriek bez štrukturovaného povrchu a s deponovanou hrúbkou zlata 1, 5 a 8 nm. Pri raste takejto vrstvy sa spočiatku vytvárajú lokalizované klastre, ktoré sa spájajú do ucelenej vrstvy až od istej hrúbky. Po správnom žíhaní sa tieto oblasti roztavia a opätovne tuhnú v tvare nanočastíc. Z experimentu vyplynulo, že optimálna hrúbka deponovanej vrstvy je 1 nm. Tieto vrstvy boli následne žíhané pri teplote 650°C po dobu 10, 20 alebo 40 minút. Boli vytvorené snímky pomocou SEM, ktoré potvrdili tvorbu nanočastíc z nespojitej vrstvy (**Obr. 11** vpravo). Práve počas času 40 minút dochádzalo k vyššej pravdepodobnosti tvorby nanočastíc veľkosti 6-10 nm, vid' **Obr. 11A) B)**. Práve tento rozmer je ideálny pre využitie na rast GaP nanodrôtov [5].

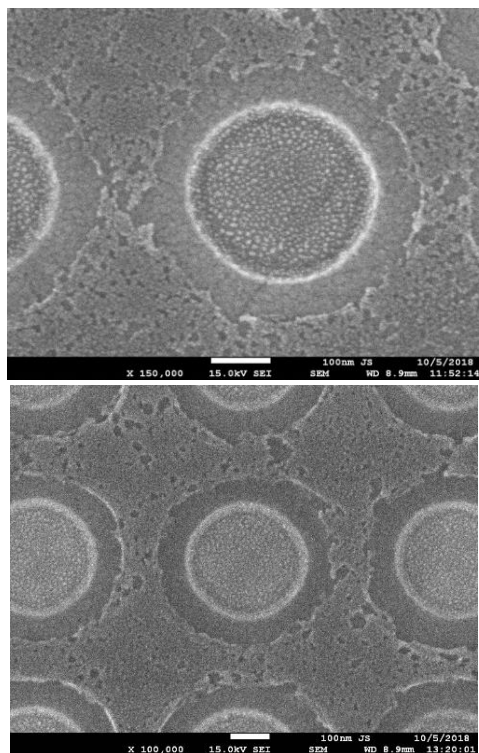


Obr. 11: Hustota pravdepodobnosti výskytu rôznych veľkostí nanočastíc v kruhu s $r = 50 \text{ nm}$ a mikrogramy agregovaných častíc pre A) čas žihania 10 min B) čas žihania 40 min

Skúsenosti z predošlých fáz experimentu boli využité v záverečnej fáze. Na povrch pripravených GaP(111) substrátov s nanoštruktúrami bola deponovaná tenká vrstva zlata. Po aplikácii na pripravenú štruktúru bol pomocou Lift-off odstránený fotorezist a tým došlo k vytvoreniu lokalizovaných kruhových klastrov tenkej nespojitej vrstvy.

Na odstránenie rezistu bola použitá kyslíková plazma. Vzhľadom na zlaté nanočastice bolo nutné zvoliť vhodný čas zotrvania vzorky v kyslíkovej plazme, pretože pri príliš dlhom čase RF výboj nanočastice zahrial a následne došlo k ich odpareniu. Výsledok experimentu dokazuje, že týmto spôsobom je možné odstrániť fotorezist bez

poškodenia zlatých nanočastíc, avšak z **Obr. 12** je zrejmé, že na substráte sa stále vyskytuje tenká reziduálna vrstva fotorezistu. Pre následný rast nanodrôtov vo vytvorených pravidelných poliach zlatých nanočastíc bude ešte nutné nájsť postup na dočistenie zvyšku rezistu.



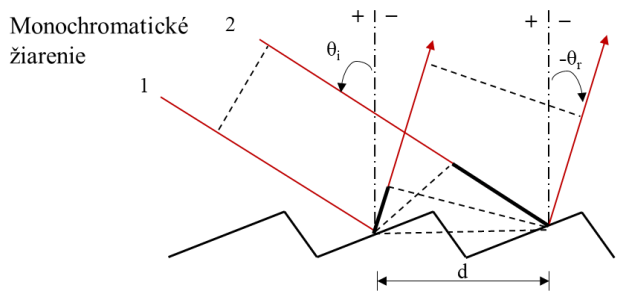
Obr. 12 Polia zlatých nanočastíc pravidelne rozmiestnené v 250 nm kruhových plochách s reziduálnymi zvyškami fotorezistu v okolí

Týmto sa experimentálne podarilo určiť podmienky pre získanie optimálnej veľkosti nanočastíc a v záverečnom experimente boli vytvorené polia zlatých nanočastíc pravidelne rozmiestnené v 250 nm kruhových plochách na GaP (111) substráte. Takto pripravený GaP substrát bude po dočistení vhodný pre rast usporiadaných nanodrôtov

3.5. Numerická analýza štruktúr pripravených pomocou NIL technológie

Periodické štruktúry pri vhodne zvolenej perióde a vhodnom materiálovom základe dokážu, významne vplývať na optické žiarenie. Taktiež vykazujú viaceré efekty v závislosti od pomeru vlnovej dĺžky žiarenia a periódy štruktúry. Z toho vznikol predpoklad, že periodické štruktúry vytvorené aj pomocou opísaných technologických postupov budú vykazovať difrakčné vlastnosti. To bolo overené experimentálnym pozorovaním, kedy bola vytvorená štruktúra exponovaná polychromatickým žiarením, dopadajúcim pod uhlom $\theta_i = 60^\circ$ vzhľadom na kolmicu. Nad štruktúrou, bola umiestnená kamera, zachytávajúca odrazené žiarenie. V priebehu experimentu bol menený sklon vzorky, bez zmeny polohy zdroja a kamery. Na získaných snímkach z kamery, pri náklonoch vzorky od $0^\circ - +/ - 15^\circ$, možno vidieť zmeny v difragovaných vlnových dĺžkach pri rôznych stupňoch náklonu vzorky.

Ak o dopadajúcom žiarení na vytvorenú nanoštruktúru – difrakčnú mriežku uvažujeme ako o paralelných lúčoch monochromatického žiarenia vychádzajúceho z jedného zdroja žiarenia, pričom ich uhol dopadu vzhľadom na kolmicu je θ_i , tak tieto lúče sú difragované pod uhlom $-\theta_r$.



Obr. 13: Dopad monochromatického žiarenia pod uhlom θ_i na difrakčnú mriežku s periódou d a jeho difrakcia pod uhlom $-\theta_r$.

Záporné znamienko vychádza na základe definovania konvencií pre následné názornejšie popísanie a výpočet kladných a záporných rádov difrakcie. Kladné rády difrakcie sú merané resp. vypočítané v smere vľavo od kolmice, pričom záporné v smere doprava. Na základe **Obr. 13** je možné vidieť, že lúč 2 prekonáva dlhšiu vzdialenosť oproti lúču 1.

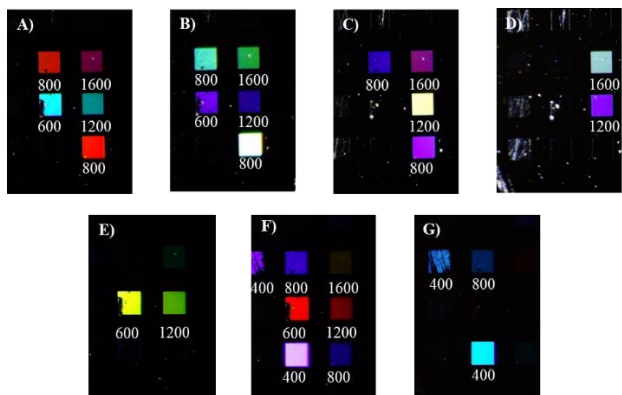
V prípade dopadu žiarenia, ktoré nie je monochromatické, a teda pokrýva určité spektrum vlnových dĺžok (polychromatický zväzok žiarenia) pod určitým uhlom (v prípade nášho experimentu θ_i), je možné vypočítať vlnovú dĺžku zodpovedajúcu jednotlivým rádom difrakcie pri ktorých sa žiarenie difraguje kolmo nahor smerom do objektívu kamery pomocou vyššie definovaných vzťahov ako:

$$\lambda = \frac{d(\sin\theta_i + \sin\theta_r)}{m} \quad (1)$$

Pre jednotlivé rády difrakcie $m = 1, 2, 3, 4$ a 5 , $\theta_i = 60^\circ$ a $\theta_r = 0$ dostávame pre periódy pripravených štruktúr $d = 400, 600, 800, 1200$ a 1600 nm hodnoty difragovaných vlnových dĺžok žiarenia v smere kolmice na povrch vzorky. V **Tab. 1** sú zanesené dominantné hodnoty difragovanej vlnovej dĺžky získanej porovnaním s výstupom z kamery znázornenom na **Obr. 14**.

Tab. 1: Difragované žiarenia v smere kolmo nahor do objektívu kamery, pre všetky uhly natočenia vzorky a difrakčná účinnosť získaná pomocou RCWA simulácie. Červené polia – 2. rád, šedé polia – 3. rád

Periód (nm)	Natočenie vzorky ($\theta_i = 60^\circ$), hodnoty λ [nm]/účinnosť[%]						
	0	5	10	15	-5	-10	-15
400	-	-	-	-	397,4 / 0,003	445,3 / 0,157	489,9 / 0,126
600	519,6 / 0,145	439,2 / 0,169	-	-	596,1 / 0,142	668 / 0,142	734,8 / 0,054
800	692,8 / 0,174	585,6 / 0,148	473,9 / 0,133	-	397,4 / 0,002	445,3 / 0,131	489,9 / 0,012
1200	519,6 / 0,051	439,2 / 0,053	710,9 / 0,111	537,9 / 0,163	596,1 / 0,079	668 / 0,099	734,8 / 0,003
1600	692,8 / 0,027	585,6 / 0,061	473,9 / 0,032	717,3 / 0,099	529,8 / 0,004	593,8 / 0,001	-



Obr. 14: Snímky zaznamenávajúce odrazené vlnové dĺžky žiarenia a perióda danej štruktúry. A) vzorka s nulovým náklonom B) Náklon vzorky o 5° C) Náklon vzorky o 10° D) Náklon vzorky o 15° E) Náklon vzorky o -5° F) Náklon vzorky o -10° G) Náklon vzorky o -15°

Ako možno vidieť, hodnoty uvedené v **Tab. 1** korešpondujú s vlnovými dĺžkami zaznamenanými kamerou. Tieto hodnoty vychádzajú z predpokladu dokonalej mriežky a nezohľadňujú difrakčnú účinnosť jednotlivých rádov. Z tohto dôvodu v experimente nebol pozorovaný vplyv difrakcie vyšších rádov a štruktúry, ktoré na základe teoretického výpočtu majú difragovať žiarenie vo viditeľnej oblasti spektra vo vyšších rádoch sa javili ako tmavé. Pre bližší pohľad na správanie sa štruktúr boli zvolené simulačné metódy, ktoré umožňujú zohľadniť viaceré parametre reálne pripravených štruktúr.

Ako vhodná simulačná analýza bola zvolená metóda viazaných rovinných vĺn (z angl. Rigorous Coupled-Wave Analysis). Boli vykonané simulácie difrakcie dopadajúceho žiarenia pod uhlami 0° až 89° v rozsahu vlnových dĺžok 200 nm až 2000 nm. Žiarenie dopadalo na nanoštruktúru rovnobežných línií s periódou 800 nm, šírkou línie 400 nm a hĺbkou 160 nm. Difrakcia v určitom ráde je pre každú vlnovú dĺžku pod iným uhlom a simulačne pomocou RCWA metódy je možné identifikovať pre konkrétnu vlnovú dĺžku, ktorá je difragovaná pod určitým uhlom, difrakčnú účinnosť. Tieto simulácie

preukázali, že difrakčná účinnosť v záporných rádoch klesá pre dopadajúce žiarenie pod väčším uhlom od kolmice k povrchu mriežky. Z výsledkov simulácie je tiež pozorovateľná difrakčná účinnosť žiarenia určitej vlnovej dĺžky difragovanej v určitom ráde v závislosti od geometrie difrakčnej mriežky. Do **Tab. 1** boli prenesené iba vypočítané hodnoty difrakčnej účinnosti pre vlnové dĺžky žiarenia vo viditeľnom spektre pre difrakciu v smere kolmo nahor do objektívu kamery.

4. Záver

Táto práca pozostáva z opisu súčasného stavu problematiky technológií tvarovania v mikroelektronike a potrebe zavedenia NGL technologických procesov. Medzi tieto procesy možno zaradiť technológie ako EBL, EUV, AFML a NIL. Každý z nich bol venovaný priestor, kde boli pojednávané ich výhody ako aj nevýhody. S prihliadnutím na tézy dizertačnej práce bola diskusia o NIL obsiahlejšia, kedy pozostávala z klasifikácie jednotlivých poddruhov NIL. Taktiež bol opísaný samotný technologický proces nanoimprint litografie, krok po kroku. Prvým krokom bola kapitola venujúca sa výrobe pečiatok a ich povrchovej úprave. Na základe teoretických poznatkov boli identifikované jednotlivé materiály vhodné pre antiadhéznú vrstvu pečiatok použité v experimentálnej časti. Následne boli analyzované požiadavky na materiály vhodné ako rezisty pre NIL s prihliadnutím na ich depozíciu a tok v štruktúrach pečiatky. Diskusia bola venovaná aj spôsobom leptania vhodných pre prenos motívu z objemu rezistu

do substrátu a následným procesom. Vzhľadom na rozmery vytváraných štruktúr nie je získanie ich topológie triviálnou záležitosťou a preto boli opísané vhodné metódy vyšetrovania povrchu vytvorených štruktúr. Taktiež bolo opísané využitie NGL v aplikáciách v obore fotoniky, kam spadá príprava fotonických kryštálov a uplatnenie v fotovoltaike a integrovanej fotonike. V rámci riešenia tejto problematiky boli získané nové poznatky aj v oblasti tvarovania nízko rozmerných štruktúr s dôrazom na UV nanoimprint litografiu.

V experimentálnej časti boli nazhromaždené znalosti zahrnuté pri príprave pečiatok a ich prvotnej analýze. Tieto analýzy následne poskytli referenciu využitiu v neskorších fázach experimentu na vyhodnotenie vernosti zhotovovaných nanoštruktúr. Experimentálne boli pripravené antiadhézne vrstvy ovplyvňujúce povrchové vlastnosti pečiatky, čo umožnilo efektívnejšiu separáciu po otláčaní. Následne bola optimalizovaná príprava substrátov a depozícia fotorezistu mr-UVCur 21. Jednalo sa o tekutý polymérny systém s nízkou viskozitou a

vysokou citlivosťou na UV žiarenie v rozsahu 320 – 420 nm. S jeho využitím bola vyhotovená séria experimentov ktorých výstupom bola závislosť deponovaných hrúbok fotorezistu od času nanášania. Táto závislosť dopomohla k optimalizácii depozičného procesu vzhľadom na potrebu efektívne ovplyvňovať reziduálne hrúbky fotorezistu po otlačení. Reziduálna hrúbka zabráňovala poškodeniu pečiatky pri priamom kontakte so substrátom, avšak ďalšie technologické procesy vyžadovali jej minimálnu hrúbku.

Bol optimalizovaný samotný proces prenosu motívu do objemu fotorezistu, kedy boli systematicky menené parametre samotného nanoimprint procesu. Vzhľadom na rôznu úroveň transparentie jednotlivých pečiatok bolo nutné optimalizovať expozičnú dávku žiarenia potrebnú pre polymerizáciu fotorezistu.

Bola vykonaná séria experimentov, kedy bol menený čas kontaktu pečiatky s fotorezistom pred expozíciou. Po preskúmaní vytvorených štruktúr bolo preukázané, že rozdielne časy prítaku rádovo v sekundách nespôsobujú výrazný rozdiel v kvalite štruktúr, alebo vo výťažnosti. Doba potrebná na vyplnenie všetkých dutín štruktúr pečiatky bola určená pomocou teoretického výpočtu rádovo na úrovni milisekúnd.

Vytvorené nanoštruktúry boli v ďalšom experimente prenesené z objemu fotorezistu do objemu substrátu. Proces suchého leptania prebiehal v dvoch základných krokoch. V prvom kroku, bola odstránená spomínaná reziduálna vrstva fotorezistu. Pre vytvorenie reaktívneho iónového leptania bol zvolený kyslík. Bolo tak učinené vzhľadom na vlastnosť takéhoto leptania interagovať len s organickým povrchom fotorezistu a nenarušenia samotného substrátu. Experimentálne bola získaná závislosť poklesu hrúbky od času, pri zachovaní ostatných parametrov leptania. Tento experiment bol pre prvé priblíženie vykonávaný na exponovanom fotoreziste bez nanoštruktúr. Avšak ako sa preukázalo, bez aplikácie tlaku pečiatky je polymerizovaná vrstva fotorezistu do značnej miery nehomogénna, čo vyžadovalo väčšie množstvo meraní. Následne, po určení rýchlosti leptania bolo prístupné k aplikácii týchto parametrov pri leptaní zhotovených nanoštruktúr.

Po odstránení reziduálnej vrstvy fotorezistu a otvorení nanoštruktúr po povrch substrátu bolo prístupné k samotnému prenosu motívu do substrátu. Ako bolo preukázané tento technologický proces si vyžiadala mnoho experimentov, vzhľadom na izotropiu leptania štruktúr. Tieto experimenty je možné po sumarizácii rozdeliť do dvoch hlavných kategórií.

V prvej kategórii bol ako pracovný plyn pre suché leptanie štandardne využívaný SF_6 s prihliadnutím na zmeny ostatných parametrov leptania. Medzi tieto parametre patrili prietok pracovného plynu, vytvorenie zmesi SF_6 a O_2 v rôznych pomeroch a úpravy výkonu zdroja. Všetky tieto prístupy sa prejavili ako neúčinné pri vytváraní štruktúr so submikrónovou periódou. Vyhotovené štruktúry dosahovali výrazne kónický tvar, nezodpovedajúci pôvodnej pečiatke, ani štruktúre leptacej masky vo fotoreziste.

V druhej kategórii bol ako pracovný plyn použitý CF_4 , kedy už prvé experimenty priniesli významný pokrok v kvalite štruktúr. Pri použití tohto pracovného plynu boli získané štruktúry s malým sklonom a najnižšou periódou – 100 nm (50nm čiara).

Následne boli skúsenosti z predošlých experimentov implementované do výroby pravidelnej štruktúry zárodkov vhodných pre rast usporiadaných nanodrôtov. Ako substrát bol využitý GaP, na ktorom boli vytvorené nanoštruktúry a odstránená reziduálna vrstva fotorezistu. Následne bola deponovaná tenká nespojitá vrstva zlata, pričom klastre zlata po žihaní boli roztavené a opätovne tuhli v tvare nanočastíc. Po odstránení fotorezistu malo byť dokázané, že týmto spôsobom je možné vytvoriť štrukturované zárodky pre rast GaP nanodrôtov, avšak úplné odstránenie fotorezistu bez poškodenia zlatých nanočastíc nebolo možné.

Bol demonštrovaný postup vytvárania kovových nanoštruktúr, pomocou technologického procesu NIL a Lift-off. Nanoštruktúry boli vytvorené na vrstve SiO a následne bol motív prenesený do objemu tejto vrstvy. Po depozícii kovovej vrstvy bolo prístupné k odstráneniu obetovanej vrstvy SiO pomocou mokrého leptania v kyseline fluorovodíkovej. Avšak vzhľadom na slabé adhézne sily deponovanej kovovej vrstvy došlo v poslednom kroku k ich odstráneniu.

Experimentálne bola pozorovaná zmena difrakcie, pri zmene uhla dopadajúceho svetla. Následne boli pomocou mriežkovej rovnice numericky získané hodnoty difragovaných vlnových dĺžok. Tieto údaje boli porovnané so snímkami zaznamenávajúcimi obrazce odrazov od štruktúr získane počas experimentu. Bola preukázaná dobrá zhoda medzi údajmi získaných teoretickým výpočtom a snímkami. Pre potvrdenie bola realizovaná RCWA analýza, kedy bola vyšetrovaná závislosť difrakcie v jednotlivých rádoch od periódy vytvorených štruktúr (200 – 1600 nm). Z výsledkov simulácie je pozorovateľná difrakčná účinnosť žiarenia jednotlivých vlnových dĺžok, v konkrétnych rádoch.

5. Zhrnutie dizertačnej práce

Hlavné ciele dosiahnuté v tejto dizertačnej práci môžeme sumarizovať nasledovne:

- boli nadobudnuté nové poznatky v oblasti tvarovania nízkorozmerných štruktúr s dôrazom na UV nanoimprint litografiu a ich využitie v príprave optoelektronických prvkov
- tieto poznatky boli využité v experimentálnej časti, pri vytváraní nanoštruktúr,
- bola zvládnutá príprava antiadhézných vrstiev na povrchu pečiatok,
- bol optimalizovaný proces nanášania rezistu a experimentálne dosiahnutý kompromis medzi celkovou hrúbkou rezistu a hrúbkou reziduálnej vrstvy po otláčaní,
- bol následne odladený technologický proces nanoimprint litografie,
- boli vykonané experimenty, ktoré dokázali možnosť prípravy nanoštruktúr v objeme rezistu a následným dočistením reziduálnej vrstvy rezistu,
- bol v rámci ďalšieho spracovania týchto štruktúr pomocou suchého leptania vytvorený nanotvarovaný povrch substrátu,
- bol navrhnutý a realizovaný technologický proces pre vytvorenie pravidelnej štruktúry zárodkov vhodných pre rast usporiadaných nanodrôtov,
- bola realizovaná numerická analýza štruktúr pripravených pomocou NIL technológie,
- bola pozorovaná zhoda medzi výstupmi numerickej analýzy a experimentálnym pozorovaním,

6. Summary

The main achievements of the dissertation thesis can be summarized as follows:

- acquired new knowledge in the field of shaping low-dimensional structures with emphasis on UV nanoimprint lithography and their use in the preparation of optoelectronic elements
- the knowledge was used in the experimental part in the creation of nanostructures
- The preparation of anti-adhesive layers on the surface of stamps was successfully optimized
- Optimized resist deposition process and experimentally achieved compromise between the total resist thickness and the thickness of the residual layer after embossing,
- Subsequently tuned technological process of nanoimprint lithography,
- Experiments were performed, which proved the possibility of preparation of nanostructures in the volume of the resist and subsequent purification of the residual layer of the resist,
- In a further processing of these structures by dry etching, the nano-shaped surface of the substrate were formed
- A technological process was designed and implemented to create a regular structure of nuclei, suitable for the growth of ordered nanowires,
- Numerical analysis of structures prepared by nanoimprint lithography was performed
- A match was observed between the outputs of the numerical analysis and the experimental observations,

7. Résumé

Les objectifs principaux atteints dans la thèse peuvent être resumés comme suit:

- nouvelles découvertes était acquises dans la domaine de formation des structures de faible dimension avec l'accent sur UV lithographie par nanoimpressions et leurs utilisation pendant fabrication des éléments optoélectroniques
- les découverts décrits on étaiis utilisée pendants la phase experimentale de la création des nanostrutures
- la préparation des couches antiadhésives à la surface des timbres était maîtrisée
- le procédé d'application de résist était optimisé suivant un compromis atteint expérimentalement entre l'épaisseur totale du résist et l'épaisseur de la couche résiduelle après l'impression
- les conditions optimales du procédé de nanolithographie était atteintes
- les expériences effectués ont prouvé la possibilité de préparation des nanostructures au volume du résist suivant le nettoyage de la couche residuelle du résist
- en cours de prochain traitement de ces structures utilisant la gravure sèche, on a créer la surface nanoforme de substrat
- un proces technologique était proposé et ensuit réalisé pour créer des germes de structure régulier appropriés pour la croissance des nanofils reguliers
- on a réalisé une analyse numérique des structures fabriquées par la technologie NIL
- la cohérence entre les résultats d'analyse numérique et l'observation expérimentale était présente

8. Zoznam publikácií:

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- ADC01 DONOVAL, Martin - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - **NEVŘELA, Juraj** - KOVÁČOVÁ, Soňa - PAVŮK, Milan - JUHÁSZ, Peter - JAGELKA, Martin - KOVÁČ, Jaroslav jr. - JAKABOVIČ, Ján - CIGÁŇ, Marek - WEIS, Martin. Relation between secondary doping and phase separation in PEDOT:PSS films. In *Applied Surface Science*. Vol. 395, (2017), s. 86-91. ISSN 0169-4332 (2017: 4.439 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.093 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000390428300015.
- ADC02 JUHÁSZ, Peter - **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - UHRÍK, Ján - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - JAKABOVIČ, Ján - HARMATHA, Ladislav - WEIS, Martin. Charge injection and transport properties of an organic light-emitting diode. In *Beilstein Journal of Nanotechnology*. Vol. 7, (2016), s. 47-52. ISSN 21904286. V databáze: CC: 000368133100001.
- ADC03 LETTRICHOVÁ, Ivana - LAURENČÍKOVÁ, Agáta - PUDIŠ, Dušan - NOVÁK, Jozef - GORAUS, Matej - KOVÁČ, Jaroslav jr. - GAŠO, Peter - **NEVŘELA, Juraj**. 2D periodic structures patterned on 3D surfaces by interference lithography for SERS. In *Applied Surface Science*. Vol. 461, (2018), s. 171-174. ISSN 0169-4332 (2018: 5.155 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.115 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85049309720 ; CC: 000450528100030.
- ADC04 **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - KOVÁČOVÁ, Soňa - PAVŮK, Milan - JUHÁSZ, Peter - KOVÁČ, Jaroslav Jr. - JAKABOVIČ, Ján - WEIS, Martin. Secondary doping in poly(3,4-ethylenedioxythiophene):Poly(4-styrenesulfonate) thin films. In *Journal of polymer science. Part B. Polymer physics*. Vol. 53, No. 16 (2015), s. 1139-1146. ISSN 0887-6266 (2015: 3.318 - IF, Q1 - JCR Best Q, 1.235 - SJR, Q1 - SJR Best Q). V databáze: CC: 000357287100006.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 **NEVŘELA, Juraj** - KUZMA, Anton. Fabrication of PhC structures by using nanoimprint lithography and their optical properties. In *Technology Transfer: fundamental principles and innovative technical solutions : 3rd Annual Conference. Tallinn, Estonia. November 23, 2019*. Tallinn : Scientific Route, 2019, S. 29-31. ISSN 2585-6839. V databáze: DOI: 10.21303/2585-6847.2019.001020.

AFC02 **NEVŘELA, Juraj** - KUZMA, Anton - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - UHEREK, František. Optical properties of PhC structures prepared by the nanoimprint lithography technique. In *ACPC 2019 : Asia Communications and Photonics Conference. Chengdu, China. November 2-5, 2019*. Chesterfield : Mira Digital Publishing, 2019, Art. no. M4A.347 [3] s. ISBN 978-1-943580-34-7. V databáze: WOS: 000542671100095.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 HANIC, Michal - **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - JAKABOVIČ, Ján - DONOVAL, Martin - FLICKYNGEROVÁ, Soňa - HORÍNEK, František - MIKLOVIČ, Peter - WEIS, Martin. Conductive fabrics and polymers for biomedical applications. In *ADEPT 2014 : 2nd International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies; Tatranská Lomnica, Slovakia; June 1-4, 2014*. 1.vyd. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 208-211. ISBN 978-80-554-0881-1.

AFD02 JAGELKA, Martin - JUHÁSZ, Peter - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - **NEVŘELA, Juraj** - WEIS, Martin. Organické vodivé polyméry pre senzorické aplikácie. In *Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017*. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 56-60. ISBN 978-80-972238-1-6.

AFD03 JUHÁSZ, Peter - UHRÍK, Ján - MIČJAN, Michal - **NEVŘELA, Juraj** - NOVOTA, Miroslav - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - VÁRY, Michal - WEIS, Martin. Charge behaviour in materials for OLED application. In *ADEPT 2016 : 4th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 20-23, 2016*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2016, S. 75-78. ISBN 978-80-554-1226-9.

AFD04 JUHÁSZ, Peter - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - **NEVŘELA, Juraj** - WEIS, Martin. Injekcia a transport elektrického náboja v OLED prvkoch. In *Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017*. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 65-68. ISBN 978-80-972238-1-6.

AFD05 LETTRICHOVÁ, Ivana - LAURENČÍKOVÁ, Agáta - PUDIŠ, Dušan - NOVÁK, J. - GORAUS, Matej - KOVÁČ, Jaroslav jr. - GAŠO, Peter - **NEVŘELA, Juraj**. 2D periodic structures patterned on GaP nanocones by interference lithography. In *ADEPT 2018 : 6th International conference on advances in electronic and photonic*

technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 41-44. ISBN 978-80-554-1450-8.

- AFD06 MIČJAN, Michal - **NEVŘELA, Juraj** - NOVOTA, Miroslav - FLICKYNGEROVÁ, Soňa - JUHÁSZ, Peter - UHRÍK, Ján - JAKABOVIČ, Ján - WEIS, Martin. Ferroelectric polymer films for flexible memory devices. In *ASDAM 2014 : The 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice Castle, Slovak Republic, October 20-22, 2014*. 1.vyd. Danvers : IEEE, 2014, s. 93-96. ISBN 978-1-4799-5474-2.
- AFD07 MIČJAN, Michal - JUHÁSZ, Peter - NOVOTA, Miroslav - **NEVŘELA, Juraj** - WEIS, Martin. Organické feroelektrické diódy ako pamäťové prvky. In *Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017*. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 45-50. ISBN 978-80-972238-1-6.
- AFD08 MIČJAN, Michal - JUHÁSZ, Peter - NOVOTA, Miroslav - **NEVŘELA, Juraj** - WEIS, Martin. Vplyv kontaktného odporu v organických tranzistoroch. In *Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017*. Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 51-55. ISBN 978-80-972238-1-6.
- AFD09 **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - FLICKYNGEROVÁ, Soňa - KOVÁČ, Jaroslav Jr. - PAVÚK, Milan - JUHÁSZ, Peter - JAKABOVIČ, Ján - WEIS, Martin. Technology of conductive polymer PEDOT:PSS films. In *ASDAM 2014 : The 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice Castle, Slovak Republic, October 20-22, 2014*. 1.vyd. Danvers : IEEE, 2014, s. 29-32. ISBN 978-1-4799-5474-2.
- AFD10 **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - KOVÁČOVÁ, Soňa - JUHÁSZ, Peter - KOVÁČ, Jaroslav Jr. - JAKABOVIČ, Ján - WEIS, Martin - PAVÚK, Milan. Využitie a tvarovanie vodivého polyméru PEDOT:PSS. In *19. Škola vákuovej techniky : Vákuum a nové materiály. Štrbské Pleso, Slovensko. 9.-12. november 2016*. Bratislava : Slovenská vákuová spoločnosť, 2016, S. 119-122. ISBN 978-80-971179-7-9.
- AFD11 **NEVŘELA, Juraj** - SZOBOLOVSZKÝ, Robert - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - KOVÁČ, Jaroslav. Surface modification by UV-nanoimprint lithography for increase of hydrophilicity. In *ADEPT 2017 :*

5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2017, S. 96-99. ISBN 978-80-554-1342-6.

- AFD12 **NEVŘELA, Juraj** - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - SZOBOLOVSZKÝ, Robert - KOVÁČ, Jaroslav - NOVÁK, Jozef. Zvyšovanie účinnosti tandemových solárnych článkov pomocou periodicky usporiadaných nanodrôtov. In *Fotonika 2017 : 12. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, Slovakia. 09.-10. február 2017.* Bratislava : Medzinárodné laserové centrum, 2017, S. 74-77. ISBN 978-80-972238-1-6.
- AFD13 **NEVŘELA, Juraj** - KUZMA, Anton - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - KOVÁČ, Jaroslav jr. Production of progressive PhC structures for OLEDs using nanoimprint lithography. In *ADEPT 2018 : 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018.* 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 132-135. ISBN 978-80-554-1450-8.
- AFD14 **NEVŘELA, Juraj** - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - NOVÁK, Jozef - KOVÁČ, Jaroslav jr. Vytvorenie pravidelnej štruktúry pre rast usporiadaných nanodrôtov. In *20. Škola vákuovej techniky : Nanoelektronika a vákuum. Štrbské Pleso, Slovensko. 23. - 26. október 2018.* Bratislava : Slovenská vákuová spoločnosť, 2018, S. 98-101. ISBN 978-80-99905-00-0.
- AFD15 NOVÁK, Jozef - HASENÖHRL, Stanislav - ELIÁŠ, Peter - LAURENČÍKOVÁ, Agáta - KOVÁČ, Jaroslav jr. - SZOBOLOVSZKÝ, Robert - **NEVŘELA, Juraj**. Preparation of nanocones for SERS applications. In *ADEPT 2017 : 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017.* 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2017, S. 1-4. ISBN 978-80-554-1342-6.
- AFD16 NOVOTA, Miroslav - MIČJAN, Michal - **NEVŘELA, Juraj** - FLICKYNGEROVÁ, Soňa - JUHÁSZ, Peter - MIŠICÁK, Róbert - PUTALA, Martin - JAKABOVIČ, Ján - WEIS, Martin. New phenanthrene-based organic semiconductor material for electronic devices. In *ASDAM 2014 : The 10th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice Castle, Slovak Republic, October 20-22, 2014.* 1.vyd. Danvers : IEEE, 2014, s. 97-100. ISBN 978-1-4799-5474-2.

- AFD17 REŽO, Vratislav - **NEVŘELA, Juraj** - WEIS, Martin. Opportunities and threats of printed electronics. In *21. Škola vákuovej techniky : Veda bez vákua? Štrbské Pleso, Slovensko. 1. - 4. október 2019*. Bratislava : Slovenská vákuová spoločnosť, 2019, S. 140-143. ISBN 978-80-99905-01-7.
- AFD18 ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - **NEVŘELA, Juraj** - BAUMGARTNER, J. Simple route to micro and nanopatterning - nano imprint lithography. In *ADEPT 2018 : 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018*. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, S. 45-48. ISBN 978-80-554-1450-8.
- AFD19 WEIS, Martin - **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - FLICKYNGEROVÁ, Soňa - KOVÁČ, Jaroslav Jr. - PAVÚK, Milan - JUHÁSZ, Peter - JAKABOVIČ, Ján. The role of doping in high-conductive PEDOT:PSS films. In *ADEPT 2014 : 2nd International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies; Tatranská Lomnica, Slovakia; June 1-4, 2014*. 1.vyd. Žilina : University of Žilina, 2014, s. 1-4. ISBN 978-80-554-0881-1.
- AFD20 WEIS, Martin - JUHÁSZ, Peter - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - **NEVŘELA, Juraj** - PAVÚK, Milan. Secondary doping of polymer films. In *ADEPT 2017 : 5th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Podbanské, Slovakia. June 19-22, 2017*. 1. vyd. Žilina : University of Žilina, 2017, S. 5-8. ISBN 978-80-554-1342-6.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- BEE01 ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - **NEVŘELA, Juraj**. Nano imprint lithography - problems at de-molding process. In *NNT 2018 [elektronický zdroj] : 17th International conference on nanoimprint and nanoprnt technologies. Braga, Portugal. September 18-20, 2018*. Braga : International Iberian Nanotechnology Laboratory, 2018, [2] s.

BFA Abstrakty odborných prác zo zahraničných podujatí (konferencie...)

- BFA01 DONOVAL, Martin - **NEVŘELA, Juraj** - NOVOTA, Miroslav - MIČJAN, Michal - JUHÁSZ, Peter - PAVÚK, Milan - JAKABOVIČ, Ján - WEIS, Martin. Phase separation in PEDOT:PSS films as a consequence of secondary doping. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016*. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 16. ISBN 978-80-227-4571-0.

- BFA02 JUHÁSZ, Peter - **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - UHRÍK, Ján - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - HARMATHA, Ladislav - JAKABOVIČ, Ján - WEIS, Martin. Charge transport properties of organic light emitting diode. In *ECOF-14 [elektronický zdroj] : 14th European conference on organized films. Genova, Italy. June 29 - July 2, 2015*. Genova : University of Genova, 2015, USB, [O69].
- BFA03 JUHÁSZ, Peter - UHRÍK, Ján - MIČJAN, Michal - **NEVŘELA, Juraj** - NOVOTA, Miroslav - WEIS, Martin - STUHLÍKOVÁ, Ľubica - VÁRY, Michal. Layer by layer electrical analysis of organic light emitting diodes OLED. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016*. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 36-37. ISBN 978-80-227-4571-0.
- BFA04 MIČJAN, Michal - JUHÁSZ, Peter - UHRÍK, Ján - **NEVŘELA, Juraj** - NOVOTA, Miroslav - VÁRY, Michal - PAVÚK, Milan - DONOVAL, Martin - WEIS, Martin. Application of ferroelectric polymers for memory devices. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016*. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 54. ISBN 978-80-227-4571-0.
- BFA05 **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - JUHÁSZ, Peter - UHRÍK, Ján - PAVÚK, Milan - DONOVAL, Martin - WEIS, Martin. High-conductive PEDOT:PSS films for OLED applications. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016*. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 55. ISBN 978-80-227-4571-0.
- BFA06 **NEVŘELA, Juraj** - ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - KOVÁČ, Jaroslav. Fabrication of progressive PhC structures for OLED by using Nanoimprint lithography. In *ISFOE 18 : 11th International symposium on flexible organic electronics. Book of abstracts. Thessaloniki, Greece. July 2-5, 2018*. Thessaloniki : PRAXI Network, 2018, [1] s.
- BFA07 NOVOTA, Miroslav - MIŠIČAK, Róbert - **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - DONOVAL, Martin - JAKABOVIČ, Ján - PUTALA, Martin - WEIS, Martin. Application of phenanthrene derivatives with alkyl bithiophene arms for organic devices. In *ICOE 2016 : Book of Abstracts : 12th International conference on organic electronics. Bratislava, Slovakia. June 13-15, 2016*. 1. vyd. Bratislava : STU, 2016, S. 56. ISBN 978-80-227-4571-0.
- BFA08 ŠKRINIAROVÁ, Jaroslava - KOVÁČ, Jaroslav jr. - UHEREK, František - **NEVŘELA, Juraj**. Nano imprint lithography -Issues at the

de-molding process. In *MNE 2018 [elektronický zdroj] : Book of abstracts. 44th International conference on micro and nanoengineering. Copenhagen, Denmark. September 24-27, 2018.* Copenhagen : Congress Department, 2018, online, Arch. no. PO-01-086 [2] s.

- BFA09 WEIS, Martin - FLICKYNGEROVÁ, Soňa - **NEVŘELA, Juraj** - MIČJAN, Michal - NOVOTA, Miroslav - JUHÁSZ, Peter - JAKABOVIČ, Ján. High-conductive PEDOT:PSS films: The true role of doping. In *ICOE 2014 [elektronický zdroj] : Book of Abstracts. 10th International Conference on Organic Electronics. Modena, Italy, June 11-13, 2014.* Modena : Universita di Modena, 2014, online, [2] p.

FAI Redakčné a zostavovateľské práce knižného charakteru (bibliografie, encyklopédie, katalógy, slovníky, zborníky...)

- FAI01 **NEVŘELA, Juraj** (ed.) - MIČJAN, Michal (ed.) - NOVOTA, Miroslav (ed.) - KOVÁČ, Jaroslav jr. (ed.) - SZOBOLOVSZKÝ, Robert (ed.). *International workshop on devices and applications project : Escel ju Osiris. Bratislava, Slovakia. December 14-15, 2017.* 1.vyd. Bratislava : Desidia Tech l.t.d, 2017. 42 s. ISBN 978-80-972928-1-2.

- FAI02 **NEVŘELA, Juraj** (ed.) - MIČJAN, Michal (ed.) - NOVOTA, Miroslav (ed.) - KOVÁČ, Jaroslav jr. (ed.). *ADEPT 2018 : 6th International conference on advances in electronic and photonic technologies. Tatranská Lomnica, Slovakia. June 18-21, 2018.* 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018. 234 s. ISBN 978-80-554-1450-8.

Zoznam citácií

- [1] SILFVAST, W.T., WOOD II, O.R. Tenth micron lithography with a 10 Hz 37.2 nm sodium laser. *Microelectronic engineering*, 1988, 8.1-2: 3-11.
- [2] MOLLENSTEDT, G.; SPEIDEL, R. Newer developments in microminiaturization. *Proceedings P*, 1961, 3: 340-357.
- [3] PEASE, R. F. W. Electron beam lithography. *Contemporary Physics*, 1981, 22.3: 265-290.
- [4] HUA, F., et al. Polymer imprint lithography with molecular-scale resolution. *Nano letters*, 2004, 4.12: 2467-2471.
- [5] NOVAK, J., et al. Optical and mechanical properties of a compact ZnO layer with embedded GaP nanowires. *Applied Surface Science*, 2017, 395: 180-184.