

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Anton Kuzma

Autoreferát dizertačnej práce

FOTONICKÉ PRVKY PRE OPTICKÉ KOMUNIKAČNÉ SYSTÉMY

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Mikroelektronika (štúdijný odbor: 5.2.13 elektronika)

Miesto a dátum: Bratislava, jún 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Anton Kuzma
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: prof. Ing. František Uherek, PhD.
Ústav elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Jozef Jasenek, PhD., Ústav elektrotechniky FEI STU v Bratislave
RNDr. Eva Majková, DrSc., Úrad SAV, Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:o.....h.

Na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity
v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU

Obsah

1	Úvod.....	4
2	Prehľad súčasného stavu	6
2.1	Optické vlnovody	6
2.2	Technológia výroby optických vlnovodov na báze nízkeho kontrastu indexu lomu	6
2.3	Technológia výroby optických vlnovodov na báze vysokého kontrastu indexu lomu	6
2.4	Základná charakterizácia fotonického kryštálu.....	6
2.5	Vrstvy s kovovými nanočasticami	7
3	Ciele dizertačnej práce	8
4	Dosiahnuté výsledky	9
4.1	Y-delič s fotonickým kryštálom.....	9
4.2	MMI delič optického výkonu	10
4.3	Návrh AWG de/multiplexora	11
4.4	Návrh ADD/DROP filtra ako senzora vlhkosti.....	11
4.5	Charakterizácia vrstiev kovových nanočastíc	13
4.6	Simulácie OLED	17
5	Hlavné prínosy dizertačnej práce	20
6	Záver.....	21
7	Summary	23
	Použitá literatúra	24
	Zoznam publikácií autora.....	26
	Ohlasy na publikácie autora	30

1 Úvod

Optické komunikačné systémy (OKS) sú druhom komunikačných systémov využívajúcich na prenos informácií svetlo. Prenos informácií pomocou svetla nie je novinkou súčasnej doby v oblasti komunikačných systémov. Svetlo ako nositeľ informácií stálo pri zrode prvých komunikačných systémov, kedy sa ľudia dorozumievali pomocou signálnych ohňov. Spoločne s nimi sa na komunikáciu využívali aj dymové signály. V neskorších dobách využívali námorníci na komunikáciu medzi loďami na moriach svetelné signály. V súčasnosti sú komunikačné systémy využívajúce metalické vedenia nahradzované pomocou OKS. Metalické vedenia sa dostávajú na limitné hodnoty z hľadiska šírky prenášaného pásma, avšak požiadavky účastníkov sa stále zvyšujú. OKS sa vyznačujú veľkou šírkou prenášaného pásma, malým útlmom, nízkymi nákladmi v prepočte na 1 bit, malými rozmermi, nízkou hmotnosťou prenosového média, odolnosťou voči elektromagnetickému rušeniu a odolnosťou voči odpočúvaniu.

Najrozšírenejším prenosovým médiom OKS je optické vlákno. Spolu so zdrojom a príjimačom optického žiarenia tvoria základné časti OKS. Ako zdroje optického žiarenia sa využívajú elektroluminiscenčné diódy (LED) a laserové diódy (LAD). Najpoužívanejšími detektormi optického žiarenia sú lavínové fotodiódy (APD) a PIN fotodiódy. Na prenos informácií sa využíva optické žiarenie v spektrálnej oblasti 800 nm – 1600 nm. Z hľadiska vlastností optických vlákien a ich fyzikálnych limitov sú na prenos v OKS využívané vlnové dĺžky žiarenia 850 nm, 1310 nm a 1550 nm. V súčasnosti sa v prevažnej miere výskum zameriava na zabezpečenie čisto optického spracovania signálov. Cieľom je odstrániť elektronické komponenty a tým pádom eliminovať nutnosť konverzie optického signálu na elektrický a opačne.

Dizertačná práca sa zaoberá návrhom a simuláciami progresívnych fotonických štruktúr, ktoré prispievajú k zlepšeniu vlastností fotonických prvkov. Navrhované fotonické prvky sú založené prevažne na báze technológie s nízkym kontrastom indexu lomu a technológie s vysokým kontrastom indexu lomu. V návrhoch jednotlivých prvkoch boli využité vlastnosti fotonických kryštálov (PhC) a kovových nanoštruktúr pozostávajúcich z kovových nanočastíc vykazujúcich plazmonické rezonancie. PhC ako aj nanočasticové vrstvy majú unikátne vlastnosti, ktoré vhodným aplikovaním prispievajú k zlepšeniu vlastností fotonických prvkov. Určovanie vlastností týchto fotonických štruktúr si pre každú aplikáciu vyžaduje osobitý prístup. Existujú rôzne simulačné metódy, ktoré nám poskytujú možnosti na charakterizáciu rozmanitých vlastností progresívnych fotonických štruktúr. Jednotlivé simulačné metódy sú založené na numerických výpočtoch s rôznym prístupom k výpočtu šíriaceho sa optického žiarenia prostredníctvom fotonických štruktúr, pričom každý z prístupov je špecifický a ponúka možnosti na odsimulovanie špecifických vlastností.

Fotonické prvky na báze progresívnych fotonických štruktúr sú navrhované v integrovateľnej forme ako prvky fotonického integrovaného obvodu (photonic integrated circuits - PIC). PIC môžu byť integrované vo forme modulej, hybridnej alebo monolitickej integrácie. Monolitická integrácia predstavuje použitie rovnakého materiálového základu pre celý PIC, čo má za následok použitie jednoduchšej technológie a tým je možné dosiahnuť zníženie výrobných nákladov. Najlepšie zvládnutá technológia v príprave elektronických aj fotonických prvkov je na báze kremíka (Si). Kremík je základom technológie s nízkym kontrastom indexu lomu v prevedení silica on silicon (SOS), ako aj technológie s vysokým kontrastom indexu lomu v prevedení silicon on insulator (SOI). Kremík a oxid kremičitý (SiO_2) sú svojimi vlastnosťami vhodnými materiálmi na prenos optického žiarenia s vlnovou dĺžkou využívanou v OKS a taktiež boli vyvinuté vhodné fotodetektory na báze kremíka. Najväčšou prekážkou ostáva zdroj optického žiarenia, vyrobený na kremíkovom materiálovom základe, ktorý by spĺňal dostatočné podmienky pre potreby monolitickej integrácie.

V práci sa nachádzajú návrhy a simulácie vlastností deličov optického žiarenia s rôznym princípom delenia optického výkonu, návrh vlnových (Array Waveguide Gratings – AWG) multiplexorov a demultiplexorov založených na technológii s vysokým kontrastom indexu lomu, návrh sensorického prvku vo forme ADD/DROP filtra vytvoreného v štruktúre fotonického kryštálu a simulácie optických parametrov rôznych fotonických štruktúr vytvorených z kovových nanočastíc (Nanoparticles - NPs) vykazujúcich plazmonické rezonancie, ktoré zabezpečujú zlepšenie parametrov pasívnych a aktívnych fotonických prvkov. Simulácie uvedených fotonických štruktúr umožňujú spoznať na ich vlastnosti a nahliadnuť na ich dopad pri interakcii s optickým žiarením, čo je veľmi dôležité pri ich návrhu a následnej implementácii do fotonických prvkov za účelom zlepšenia ich vlastností. Návrh a simulácie prebiehajú v softvérovom nástroji RSoft Photonic Component Design Suite pomocou počítačových návrhových prostriedkov (Computer Aided Design - CAD) a rôznych simulačných metód.

2 Prehľad súčasného stavu

2.1 Optické vlnovody

Vlnovody sú základným prvkom integrovanej fotoniky používaným na vedenie optického žiarenia. Vlnovod vzniká ohraničením oblasti schopnej viesť optické žiarenie oblasťou s nižším indexom lomu. Takto vznikne optická štruktúra, v ktorej je splnená podmienka totálneho odrazu žiarenia. Takáto štruktúra môže byť ohraničená v jednom smere, čím vytvoríme planárny vlnovod a v prípade ohraničenia v dvoch smeroch dôjde k vytvoreniu pásikového vlnovodu, ktorý sa môže deliť medzi viacero druhov v závislosti od spôsobu ohraničenia [1]. Samostatné optické vlnovody rôznych parametrov sú stavebným prvkom fotonických prvkov. Existujú rôzne technológie prípravy vlnovodov na rôznom materiálovom základe. Podľa veľkosti kontrastu indexu lomu ich delíme na technológie s nízkym kontrastom indexu lomu a na technológie s vysokým kontrastom indexu lomu. V oboch prípadoch má najväčšie zastúpenie technológia na báze *Si*.

2.2 Technológia výroby optických vlnovodov na báze nízkeho kontrastu indexu lomu

Najčastejším a najjednoduchším spôsobom výroby vlnovodu v kremíkovej technológii s nízkym kontrastom indexu lomu je narastenie dopovanej vrstvy SiO_2 na nedopovanú vrstvu SiO_2 . Na dopáciu musí byť použitý dopand, ktorý zvyšuje index lomu [2]. Na šírenie optického žiarenia vo vlnovode na základe podmienky totálneho odrazu na rozhraní postačuje zmena indexu lomu na úrovni 0,01. Takýto materiálový základ sa označuje ako základ s nízkym kontrastom indexu lomu „silica-on-silicon“ (SOS) a vyznačuje sa nízkymi vložnými stratami pre šíriace sa optické žiarenie prostredníctvom vlnovodov [3] vyrobených na jeho báze.

2.3 Technológia výroby optických vlnovodov na báze vysokého kontrastu indexu lomu

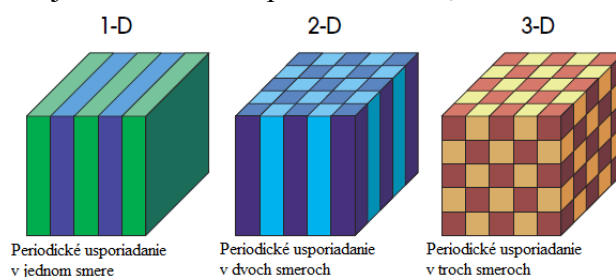
Technológia prípravy fotonických prvkov na báze vysokého kontrastu indexu lomu „silicon-on-insulator“ (SOI) spočíva v prenesení vzoru z masky do už pripravenej štruktúry SOI na *Si* substráte. SOI štruktúra pozostáva z kremíkoveho substrátu, na ktorom sa nachádza SiO_2 vrstva, ktorá oddeľuje kremíkový substrát od *Si* vrstvy o hrúbke 220 nm. Existuje niekoľko spôsobov na vytvorenie štruktúry s takýmto usporiadaním. Najrozšírenejším je použitie metódy implantácie kyslíka pomocou kyslíkového iónového zväzku (Separation by IMplantation of OXYgen - SIMOX) súčasne s vysokoteplným žiahaním [4, 5]. Takto vytvoríme vo vrstve *Si* zapustenú oddeľovaciu SiO_2 vrstvu. Takto pripravená štruktúra slúži ako základ pre výrobu vlnovodov a fotonických prvkov vyznačujúcich sa malými rozmermi [6].

2.4 Základná charakterizácia fotonického kryštálu

Analógiou PhC je vo svete elektronických materiálov obyčajný kryštál. Kryštál je tvorený periodicky usporiadanými atómami a molekulami. Spôsob ako sú atómy a molekuly usporiadané v kryštáli nazývame kryštalická mriežka. Periodický potenciál pôsobiaci na elektrón šíriaci sa v kryštáli spoločne s geometriou mriežky udávajú vodivé vlastnosti kryštálu. Z kvantovej teórie vyplýva, že elektróny sa v kryštáli šíria ako vlny a preto nedochádza k ich rozptylu na mriežke. V mriežke kryštálu môžu existovať pásma, ktoré zabraňujú šíreniu vln s určitou energiou v určitom smere. Ak existuje pásmo, kde sa nešíria vlny v každom smere, tak hovoríme o kompletnom zakázanom pásme. Takéto pásmo sa nachádza v polovodičových materiáloch medzi valenčným a vodivostným pásmom.

Fotonický kryštál je analógiou pre kryštál v optike. Atómy a molekuly sú nahradené makroskopickými časťami materiálov s rôznymi dielektrickými konštantami. Ak je materiál neabsorpčný a zmeny dielektrických konštant vo fotonickom kryštáli sú veľké, tak dochádza k lámaniu a odrazu dopadajúceho žiarenia na fotonický kryštál na rozhraniach zmien týchto dielektrických konštant vo fotonickom kryštáli. Tak ako kryštál, ako elektrický materiál môže obsahovať zakázané pásmo, tak je možné vytvoriť fotonický kryštál so zakázaným pásmom pre šírenie určitého rozsahu frekvencií dopadajúceho žiarenia v určitom smere cez tento fotonický kryštál. Najjednoduchším príkladom je dielektrické zrkadlo, ktoré sa skladá z veľkého množstva vrstiev s periodickou zmenou dielektrickej konštanty. Na týchto rozhraniach dochádza k čiastočným odrazom a keďže je rozhranie veľá a priamo šíriace sa vlny vzájomne deštruktívne interferujú dochádza k eliminácii týchto vln.

Braggove zrkadlo je príkladom jednorozmerného fotonického kryštálu z dôvodu, že dielektrická konštant sa periodicky mení v jednom smere danom karteziánskymi súradnicami. Takýto fotonický kryštál nie je schopný vytvoriť zakázané pásmo pre šírenie elektromagnetických vln v ľubovoľnom smere. Fotonická štruktúra zložená z periodicky sa opakujúcich materiálov s rôznou dielektrickou konštantou v dvoch smeroch sa nazýva dvoj rozmerný fotonický kryštál (2D – two dimensional) a analogicky ak štruktúru tvoria materiály periodicky usporiadané v troch smeroch a s rôznou dielektrickou konštantou, tak môžeme hovoriť o trojrozmernom (3D – three dimensional) fotonickom kryštáli. Na obr. 1 je znázornené usporiadanie 1D, 2D a 3D fotonického kryštálu [7].



Obr. 1 Jednoduchý príklad jedno-, dvoj- a trojrozmerného fotonického kryštálu. Rozličné farby reprezentujú materiály s rôznou dielektrickou konštantou. Vlastnosťou fotonického kryštálu je periodicitá v jednom alebo viacerých smeroch pozdĺž osi [7].

2.5 Vrstvy s kovovými nanočasticami

Prívlastok nano prisudzujeme materiálom, ktorých aspoň jeden rozmer sa pohybuje pod úrovňou 100 nm. Nanočastice sú prvky vyrobené z materiálov takým spôsobom, že ani jeden z ich rozmerov v priestore nepresahuje 100 nm. Tieto nanočastice môžu existovať v rôznych tvaroch, najčastejšie sa ich tvar približuje tvaru guličky. Nanočastice zaraďujeme do nanooptiky, keďže ich rozmery sa nachádzajú pod difrakčným limitom optického žiarenia, ktorý je udávaný vzťahom $\lambda > 2n$, kde n je index lomu materiálu tvoriaceho nanočastice a λ je vlnová dĺžka žiarenia. Existuje viacero možností ich výroby. Medzi základné patrí laserová ablácia materiálov v roztoku [8] a chemická syntéza [9]. Medzi ďalšie metódy prípravy nanočastíc patrí Electron Beam Lithography (EBL – elektrónová zväzková litografia) [10], nanosférická litografia [11] a kombinácia rôznych foriem depozície [12]. Nanočastice pre svoje unikátne vlastnosti popisované v nasledujúcich kapitolách využívame v rôznych odvetviach priemyslu. Svoje zastúpenie majú vo farbivách, v medicíne, v kozmetike a v neposlednom rade vo výskume. Skúmajú sa ich vplyvy na zvýšenie účinnosti organických elektroluminiscenčných diód (OLED – Organic Light Emitting Diode) [13 - 16], na zvýšenie účinnosti organických solárnych článkov [17] a využívajú sa taktiež pri diagnostike biomolekúl [18 - 20].

3 Ciele dizertačnej práce

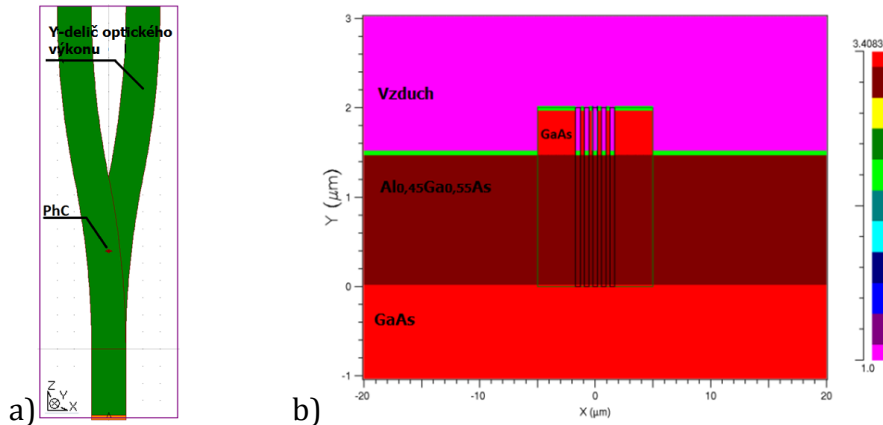
Na základe potrieb vyplývajúcich z doterajšieho stavu problematiky v oblasti fotonických prvkov a materiálových základov vhodných pre ich integráciu do fotonických integrovaných obvodov boli stanovené nasledovné ciele dizertačnej práce:

1. Navrhnuť fotonické štruktúry s topológiou umožňujúcou zmenšenie celkovej plochy fotonického prvku v monolitickej alebo hybridnej integrácii pre optické komunikačné systémy.
2. Pomocou simulačných techník overiť ich parametre a charakterizovať ich vlastnosti s ohľadom na ich použitie a prínos v optických komunikačných systémoch.
3. Získať nové poznatky v oblasti využitia kovových nanočastíc vykazujúcich plazmonické rezonancie pre aplikácie v progresívnych fotonických prvkoch.
4. Navrhnuť a pomocou simulačných techník analyzovať vlastnosti fotonického prvku pre senzorickú aplikáciu na báze progresívnej fotonickej štruktúry.

4 Dosaiahnuté výsledky

4.1 Y-delič s fotonickým kryštálom

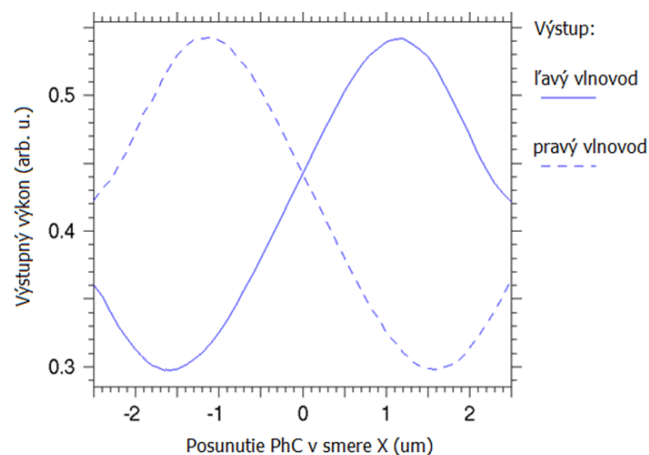
Fotonický kryštál vytvorený vo vlnovodnej vrstve navrhnutého Y-deliča dokáže svojimi vlastnosťami 10 násobne zmenšiť plochu potrebnú pre takýto Y-delič, ktorý by bol schopný deliť optický výkon s malými dodatočnými vložnými stratami na úrovni -1 dB. Ďalšou funkciou PhC je možnosť jednoduchého vytvorenia Y-deliča s rôznym deliacim pomerom. PhC bol navrhnutý vo forme kruhových otvorov usporiadaných v štvorcovej symetrii (2D), ktorá bola pootočená o 45° v smere osi y . Jeho umiestnenie ako aj prierez vlnovodu obsahujúci PhC sa nachádzajú na obr. 2.



Obr. 2 a) Y-delič optického výkonu s implementovaným fotonickým kryštálom, b) Prierez vlnovodom s integrovaným fotonickým kryštálom v materiálnej platforme $Al_{0,45}Ga_{0,55}As/GaAs$.

Pre získanie relevantných výsledkov simulácie je potrebné simuláciu Y-deliča oblasti, v ktorej je umiestnený fotonický kryštál vykonávať pomocou metódy konečných rozdielov v časovej oblasti (FDTD – Finite-Difference Time-Domain). FDTD simulačná metóda je náročná na výpočtový výkon a čas a z tohto dôvodu si je vhodné ostatné časti Y-deliča simulovať menej náročnou metódou, ktorou je metóda šírenia zväzku (BPM – Beam Propagation Method).

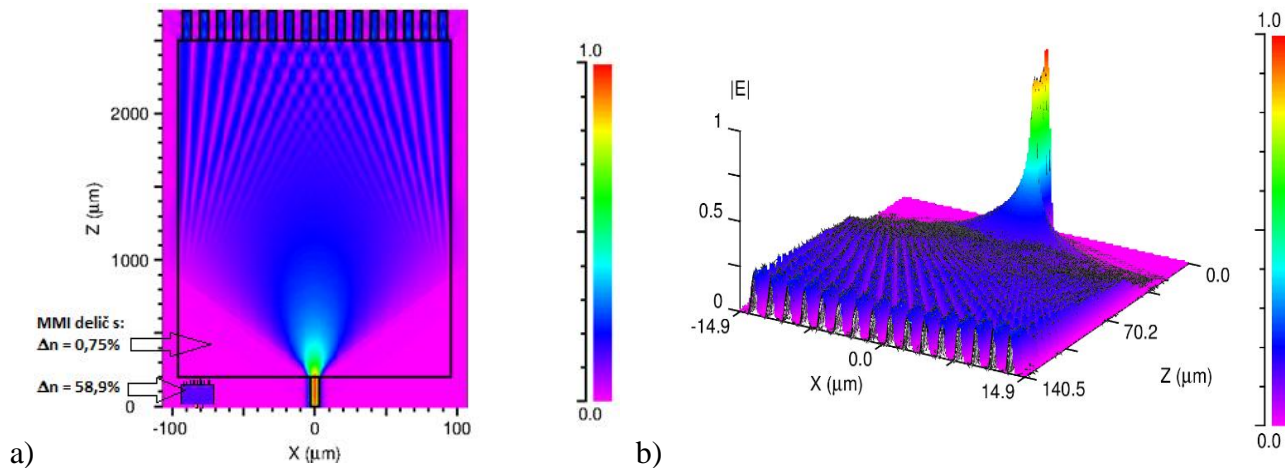
Pomocou spôsobu simulácie opísanom v predchádzajúcom odstavci bola vykonaná simulácia závislosti výstupného výkonu v jednotlivých výstupných vlnovodoch od polohy PhC v smere osi x (obr. 3). Táto simulácia ukazuje jednoduchosť zmeny deliaceho pomeru vplyvom polohy PhC. Tým pádom nie je nutné robiť návrhy s rôznou geometriou výstupných vlnovodov pre rôzne deliace pomery, ale zmení sa len súkryt masiek PhC do Y-deliča v procese litografie.



Obr. 3 Závislosť výstupného výkonu vo výstupných vlnovodoch od polohy fotonického kryštálu.

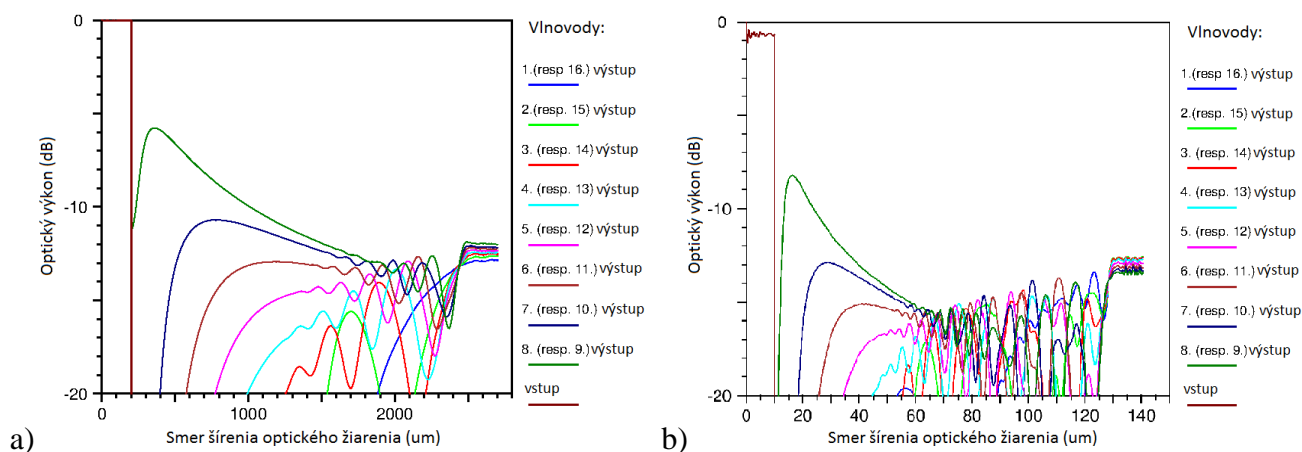
4.2 MMI delič optického výkonu

Delič optického výkonu na báze multimódovej interferencie (MMI) je vhodným fotonickým prvkom pre delenie optického výkonu medzi väčšie množstvo výstupných vlnovodov. MMI delič bol navrhnutý v technológii s vysokým kontrastom indexu lomu ($\Delta n = 58,9\%$), ako aj v technológii s nízkym kontrastom indexu lomu ($\Delta n = 0,75\%$). Porovnanie fyzických rozmerov týchto dvoch návrhov sa nachádza na obr. 4.



Obr. 4 a) Grafické porovnanie rozmerov návrhov MMI deličov s nízkym kontrastom indexu lomu a vysokým kontrastom indexu lomu (vľavo), b) priebeh optického výkonu v MMI deliči (vpravo).

Simulácie návrhu MMI deliča boli vykonané pomocou softvérového nástroja BeamPROP. Jeho základom je BPM simulačná metóda, ktorá rieši Helmholtzovu rovnicu v časovej oblasti. Tento softvérový nástroj je plne integrovaný v návrhovom prostredí RsoftCAD. Výsledok simulácie zobrazuje priebeh veľkosti optického výkonu pozdĺž smeru šírenia sa žiarenia. Priebeh veľkosti optického výkonu na obr. 5 je určovaný pomocou tzv. monitorov, ktoré sú umiestnené v dodatočných vlnovodoch, pričom umiestnenie týchto dodatočných vlnovodov neovplyvňuje výsledok samotnej simulácie z dôvodu, že v návrhu sú nastavené ako neaktívne segmenty bez určenia indexu lomu. Tieto vlnovody sa nachádzajú v MMI člene.

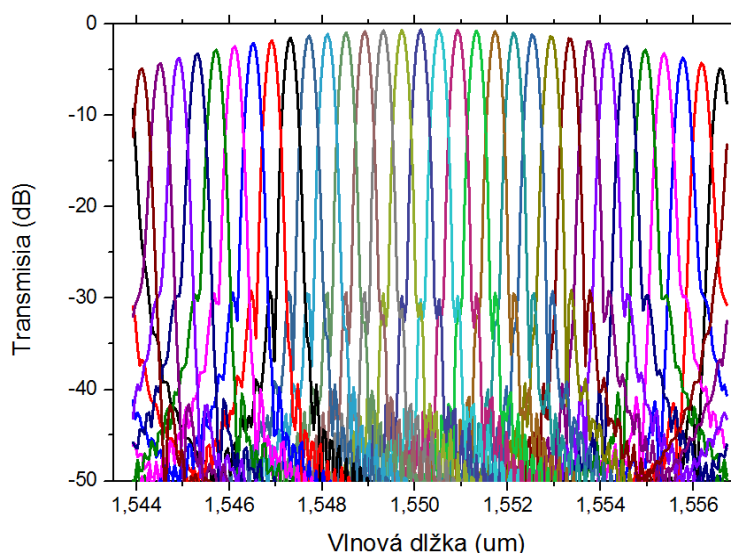


Obr. 5 Priebeh optického výkonu v MMI deličoch a) s nízkym kontrastom indexu lomu, b) s vysokým kontrastom indexu lomu.

V MMI deliči na báze technológií s vysokým kontrastom indexu lomu (konkrétne SOI [6]). dochádza k stratám pri naviazaní optického žiarenia do vlnovodu z dôvodu malých rozmerom vlnovodu ($0,45 \times 0,22 \mu\text{m}$). Tieto straty sú na úrovni -1 dB . Z tohto dôvodu je následne vo výstupných vlnovodoch optický výkon na úrovni $-13,5 \text{ dB}$ v porovnaní s optickým výkonom na úrovni $-12,5 \text{ dB}$ vo výstupných vlnovodoch MMI deliča s nízkym kontrastom indexu lomu (konkrétne SOS [5]). Ak by sme chceli hovoriť o bezstratovom deliči s deliacim pomerom 1×16 , tak úroveň optického výkonu v každom výstupnom vlnovode by musela byť rovná -12 dB . V prípade navrhovaných deličov dochádza k vložným stratám na úrovni približne $-0,5 \text{ dB}$.

4.3 Návrh AWG de/multiplexora

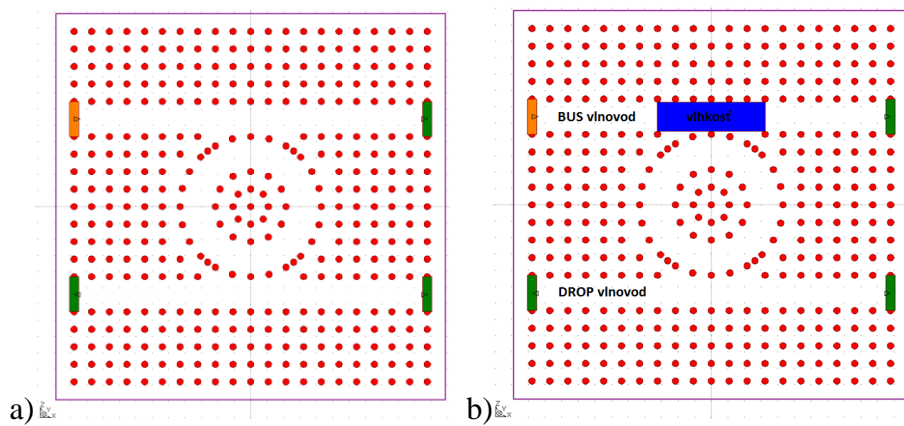
AWG bolo navrhované v prostredí RsoftCAD a simulované softvérovým nástrojom BeamPROP pomocou BPM. Na návrh bola použitá nadstavba AWG utility. AWG bolo navrhované pre SOI technológiu a centrálnu vlnovú dĺžku $1,55012 \mu\text{m}$. Každý vlnovod je široký $0,45 \mu\text{m}$ a vysoký $0,22 \mu\text{m}$. AWG bolo navrhnuté ako 1×32 multiplexor s 80 vlnovodmi v poli vlnovodov a odstupom kanálov 50 GHz , čo zodpovedá v kanáloch približne odstupu vlnovej dĺžky $0,4 \text{ nm}$. Na obr. 6 je znázornená prenosová charakteristika navrhnutého AWG, z ktorej je možné určiť parametre pre každý kanál akými sú zvlnenie v pásme priepustnosti, nelinearita, vložné straty, rovnomernosť vložných strát, centrálna vlnová dĺžka a izolácia a presluch pre susedné a obsusedné kanály.



Obr. 6 Prenosová charakteristika navrhnutého AWG 1×32 de/multiplexora.

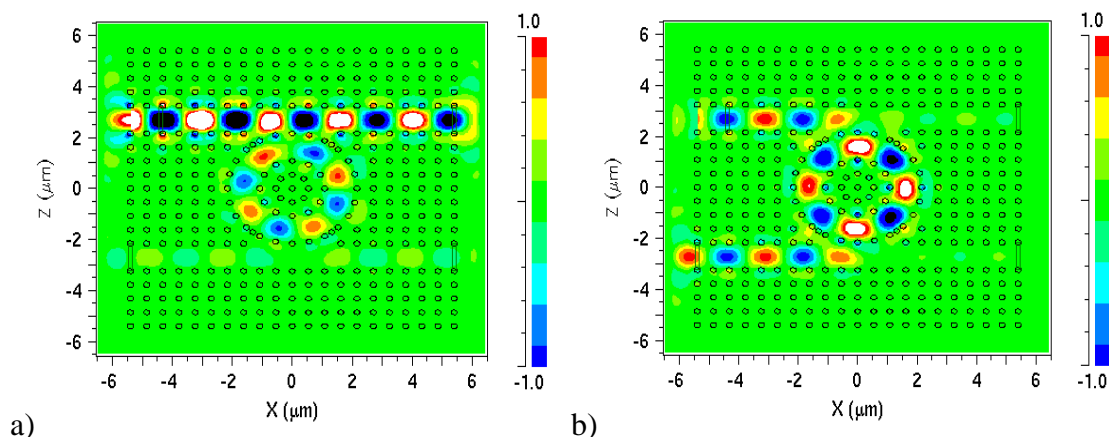
4.4 Návrh ADD/DROP filtra ako senzora vlhkosti

Využitím porúch PhC na šírenie žiarenia určitej vlnovej dĺžky dokážeme vytvoriť v PhC pomocou porúch štruktúru ADD/DROP filtra [21] (obr. 7a)). Na obr. 7b) je pohľad na štruktúru ADD/DROP filtra s umiestnením dodatočného segmentu simulujúci aplikáciu vlhkosti svojou dielektrickou konštantou. Tento fotonický prvok pre určitú vlnovú dĺžku šíriaceho sa žiarenia prenáša žiarenia zo vstupného vlnovodu označovaného ako BUS do spodného výstupného vlnovodu označovaného ako DROP na ľavý smer, pravý smer alebo na oba smery. Pre zlepšenie vlastností ADD/DROP filtra vytvoreného v PhC so štvorcovou symetriou bola symetria vnútornej kruhovej časti upravená a po vonkajšom obvode kruhu boli pridané ďalšie stĺpiky z dôvodu zvýšenia nasmerovania žiarenia do kruhovej trajektórie.



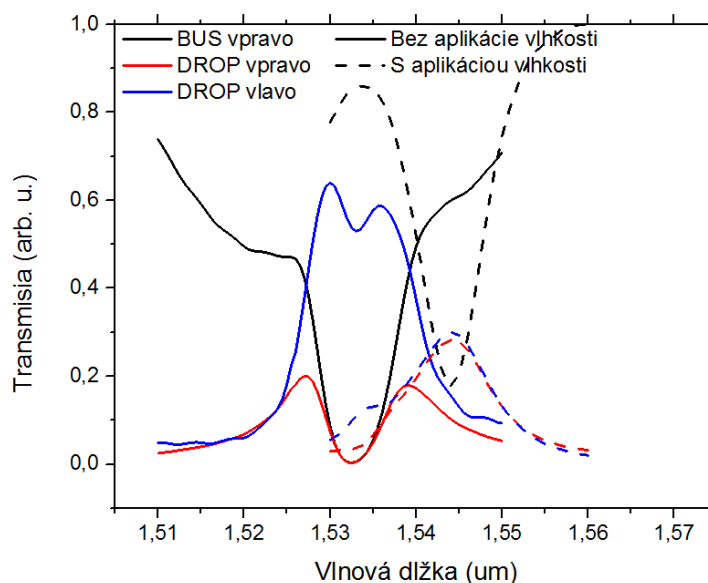
Obr. 7 Štruktúra ADD/DROP filtra vytvorená v PhC a) bez pridaného segmentu, b) s pridaným segmentom simulujúcim vlhkosť

Na obr. 8 sa nachádza pohľad na FDTD simuláciu ADD/DROP filtra, kde v časti a) obrázka je správanie filtra pre žiarenie s vlnovou dĺžkou 1510 nm, kedy je takmer celé optické žiarenie prenášané BUS vlnovodom a dochádza k vyviazaniu do DROP vlnovodu len malého podielu žiarenia z kruhového vlnovodu. V obr. 8b) sa nachádza pohľad na simuláciu ADD/DROP filtra pre žiarenie s vlnovou dĺžkou 1533 nm, pre ktoré dochádza v štruktúre filtra k tamer úplnému preneseniu optického žiarenia z BUS vlnovodu do DROP vlnovodu. Na spodných častiach obrázkov sa nachádza priebeh intenzít elektrickej zložky v Y smere elektromagnetického žiarenia v závislosti od času. Intenzita je meraná tzv. monitormi umiestnenými na začiatkoch a koncoch vlnovodov ADD/DROP filtra.



Obr. 8 FDTD simulácia ADD/DROP filtra pre a) vlnovú dĺžku žiarenia kedy nedochádza k prenosu žiarenia do DROP vlnovodu, b) vlnovú dĺžku žiarenia kedy dochádza k prenosu žiarenia do DROP vlnovodu

Po aplikovaní segmentu nahradzujúceho snímanú vlhkosť (stopové množstvo vody) dochádza vplyvom lokálnej zmeny dielektrickej konštanty k ovplyvneniu väzby žiarenia medzi BUS vlnovodom a kruhovou časťou filtra, pričom sa prenosová charakteristika filtra posúva o 10 nm smerom k vyšším vlnovým dĺžkam. To má za následok možnosť detekovať zmenu intenzity žiarenia v BUS vlnovode ako aj v DROP vlnovode v závislosti od prídania dodatočného segmentu nahradzujúceho v reálnom prevedení vlhkosť. Nasimulované spektrálne charakteristiky pre ADD/DROP filter bez pridaného segmentu ako aj so segmentom simulujúcim meranú vlhkosť sa nachádzajú na obr. 9. Z nich je možné vidieť spektrálne závislosti intenzít žiarenia v jednotlivých častiach filtra pred aplikáciou segmentu simulujúceho vlhkosť a po jeho aplikácii.

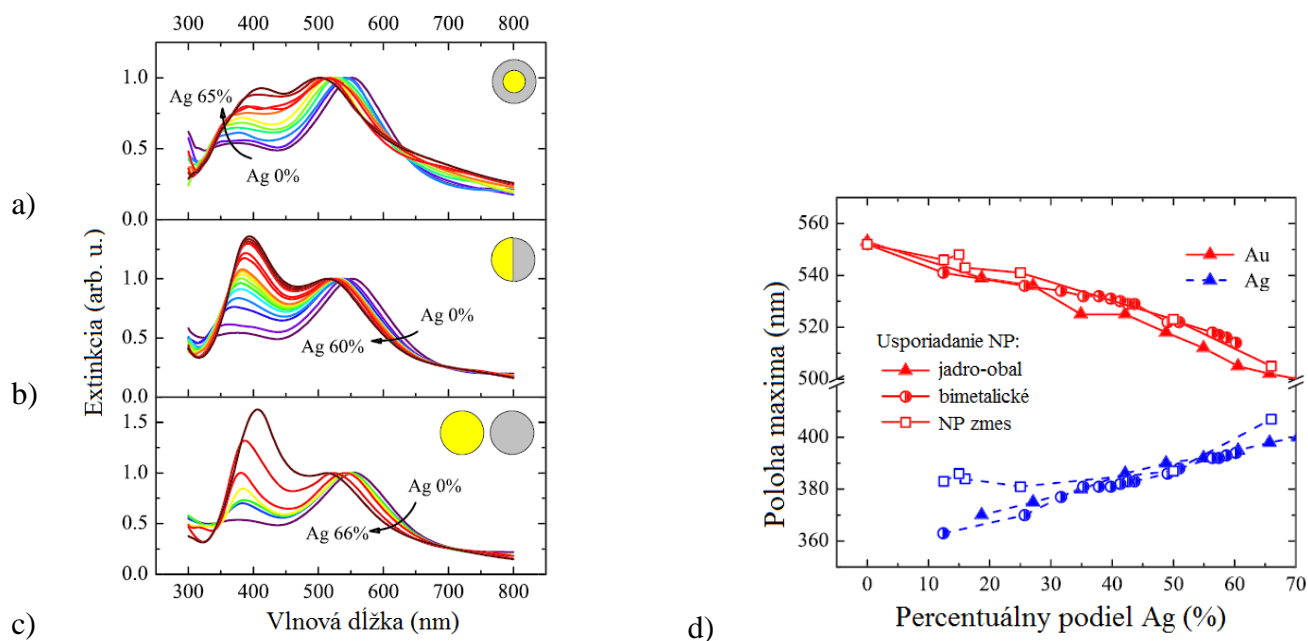


Obr. 9 Spektrálne závislosti štruktúry ADD/DROP filtra z obr. 7

4.5 Charakterizácia vrstiev kovových nanočastíc

Optické vlastnosti kovových nanočastíc boli simulované pomocou FDTD simulačnej metódy. Táto simulačná metóda je implementovaná v prostredí FullWAVE vytvorenom firmou Rsoft [22]. NPs boli simulované pomocou 2D simulácie ako jednorozmerná štruktúra vytvorená radom nanočastíc. Výsledky získané 2D simuláciou sa od 3D simulácie líšili len malými odchýlkami v častiach spektier, kde sa nenachádzalo maximum plazmonickej rezonancie a preto môže byť 2D simulácia považovaná za dostatočne presnú metódu určovania priebehov plazmonických rezonancií. Ako okrajové podmienky simulačnej domény vo vertikálnom smere (smer šírenia žiarenia a smer jeho priameho odrazu) boli použité dokonale absorbčné vrstvy (PML – Perfectly Matched Layer). V horizontálnom smere boli použité, na začiatku a na konci periódy vrstvy, periodické okrajové podmienky (PBC – Periodic Boundary Condition). PBC okrajové podmienky zabezpečujú získanie simulačných výsledkov nekonečnej dlhej periodicky sa opakujúcej štruktúry simuláciou len jednej jej periódy, čím dochádza k zníženiu času potrebného na výpočet simulácie. Priestorové rozlíšenie mriežky simulačnej domény bolo vzhľadom na kruhovo symetrický charakter NP nastavené v oboch smeroch na úrovni 0,5 nm. Transmisia a reflexia žiarenia v spektre bola vypočítaná na základe impulznej odozvy štruktúry, pričom vstupné žiarenie malo povahu impulzu. Výsledkom simulácií boli transmie optického žiarenia prostredníctvom vrstvy NPs. Vzniknutá plazmonická rezonancia spôsobuje pokles transmie optického žiarenia v priamom smere. Aplikovaním záporného logaritmu na prevrátenú hodnotu tejto transmie ($Q_{ext} = -\log T$) dostávame priebeh plazmonickej extinkcie (z angl. extinction), ďalej uvádzaná len extinkcia, pre vrstvu NPs, ktorej zodpovedá daná transmia optického žiarenia pre každý bod v spektre s krokom 60 meV vyjadreným v energetickej mierke. V práci boli študované rôzne závislosti polohy plazmonickej rezonancie od geometrických rozmerov NPs, od ich separácia kedy boli pozorované dipól-dipólové interakcie [23] a aj od indexu lomu okolitého prostredia.

Z obr. 10 je zrejmé, že pre každý druh usporiadania NPs, zložených z Au a Ag súčasne, je závislosť polohy maxím lineárna a takmer zhodná. Tento jav ukazuje limity študovania a určovania druhu usporiadania NPs pomocou metódy skúmania spektier plazmonických rezonancií.

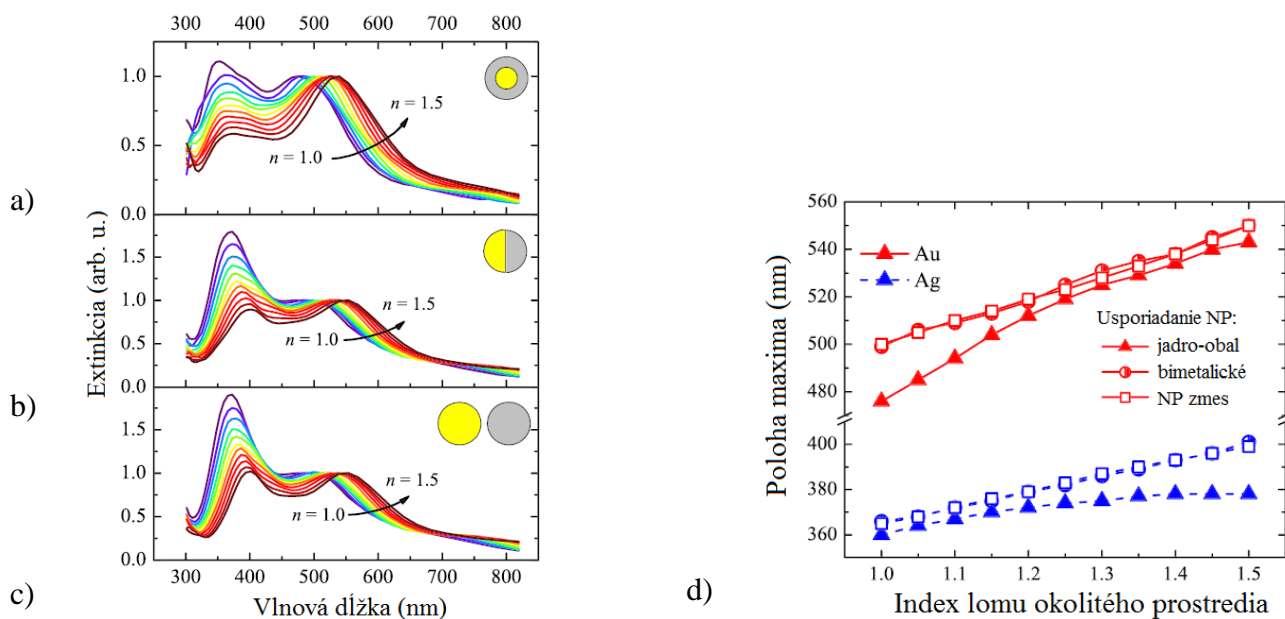


Obr. 10 Plasmonické extinkcie NPs pre rôzny pomer Au/Ag získané FDTD simuláciou usporiadania NPs a) Au/Ag jadro/obal, b) bimetalických, c) samostatných Au a samostatných Ag, d) Vynesené polohy lokálnych maxim jednotlivých zložiek NP v závislosti od pomeru zastúpenia Au/Ag pre všetky druhy usporiadania

Ak sú NPs zložené z dvoch fázovo oddelených kovových materiálov, ktoré spĺňajú podmienku pre vznik plazmonickej rezonancie, tak dochádza k vzniku dvoch lokálnych maxim, ktorých poloha sa lineárne mení v závislosti od lineárnej zmeny percentuálneho podielu jednotlivých zložiek NP. V prípade vytvorenia NPs zo zliatiny dvoch kovov bude pozorované len jedno maximum v priebehu plazmonickej rezonancie. Z tohto vyplýva, že z experimentálne získaných priebehov plazmonických rezonancií zobrazujúcich dve maximá je nemožné určiť druh usporiadania skúmaných NPs.

Na obr. 11 sa nachádzajú výsledné priebehy plazmonických extinkcií v závislosti od indexu lomu okolitého prostredia pre NPs s rôznym usporiadaním Au a Ag. Priebehy boli získané pomocou FDTD simulácií. Index lomu okolitého prostredia sa menil od hodnoty 1 po hodnotu 1,5. V experimente je takáto zmena indexu lomu dosiahnuteľná zmenou roztoku, v ktorom sa dané NPs nachádzajú.

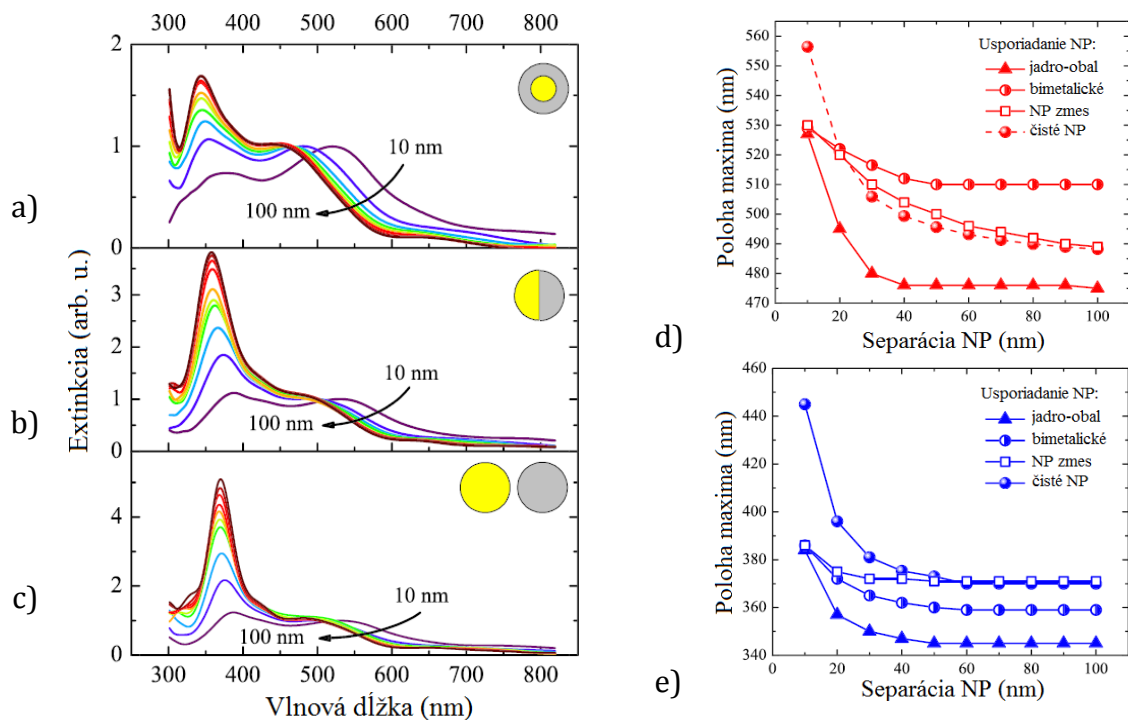
Z výsledkov simulácií je zrejmé, že s rastúcou hodnotou indexu lomu okolitého prostredia sa v spektre posúva smerom k vyšším vlnovým dĺžkam poloha lokálnych maxim reprezentujúcich prítomnosť Au aj Ag v zložení NPs pre všetky druhy usporiadania NPs (obr. 11d)).



Obr. 11 Plazmonické extinkcie NPs pre rôzne indexy lomu okolitého prostredia získané FDTD simuláciou usporiadania NPs a) Au/Ag jadro/obal, b) bimetalických, c) samostatných Au a samostatných Ag, d) Vynesené polohy lokálnych maxim jednotlivých zložiek NP v závislosti od indexu lomu okolitého prostredia pre všetky druhy usporiadania

Poloha lokálneho maxima plazmonickej rezonancie sa posúva lineárne so sklonom 10,4 nm na desatinu indexu lomu okolitého prostredia pre prípad maxima reprezentujúceho prítomnosť Au a so sklonom 7 nm na desatinu indexu lomu okolitého prostredia pre prípad maxima reprezentujúceho prítomnosť Ag v zložení NP. Takýto posun vykazujú bimetalické NPs ako aj zmes NPs zložených z čistého Au a Ag. Pre prípad jadro/obal NPs dochádza k odchýlke od lineárneho priebehu v prípade oboch závislostí lokálnych maxim (pre Au aj Ag) od zmeny indexu lomu okolitého prostredia. Poloha lokálneho maxima pre Au rastie o 18 nm s každou zmenou indexu lomu okolitého prostredia o 0,1 až kým nedosiahne tento index lomu hodnotu 1,25, vtedy tendencia posunu polohy lokálneho maxima začne kopírovať lineárnu charakteristiku príznačnú pre zvyšné dve usporiadania NPs (t.j. posun o 10 nm pri zmene indexu lomu okolitého prostredia o 0,1). Podobne sa správa aj posun polohy lokálneho maxima reprezentujúci zložku Ag v NPs. Avšak v tomto prípade práve do hodnoty indexu lomu okolitého prostredia 1,25 rast polohy maxima pre usporiadanie jadro/obal NPs sleduje tendenciu polohy maxima pre zvyšné dve usporiadania (t.j. posun o 6 nm pri zmene indexu lomu okolitého prostredia o 0,1), pokým nad hodnotou indexu lomu okolitého prostredia 1,25 dochádza k nárastu vlnovej dĺžky polohy maxima plazmonickej rezonancie o 2 nm pri zmene indexu okolitého prostredia o 0,1.

V prípade vrstvy NPs zloženej zo zmesi NPs z čistého Au a čistého Ag je možné potlačiť väzbu medzi Au a Ag. So znižovaním koncentrácie NPs (zvyšovaním ich separácie v roztoku) nastáva zvyšovanie medzičasticovej vzdialenosti r . Výsledkom tohto je, že energia plazmonickej rezonancie sleduje závislosť r^{-3} , ktorá vyplýva z potlačenia dipól-dipólových interakcií a pre prípad dostatočne veľkej separácie NPs dochádza k jej úplnému potlačeniu, čo má za následok dosiahnutie energie plazmonickej rezonancie zodpovedajúcej samostatnej NP bez medzičasticovej väzbovej energie [23]. Z hľadiska princípu usporiadania jadro/obal NPs a bimetalických NPs je nemožné predísť Au-Ag väzbe a jej vplyvu na priebeh plazmonickej rezonancie a polohy lokálnych maxim reprezentujúce jednotlivé kovy.



Obr. 12 Plasmonické extinkcie NPs pre rôzne separácie NPs získané FDTD simuláciou usporiadania NPs a) Au/Ag jadro/obal, b) bimetalických, c) samostatných Au a samostatných Ag, d) Vynesené polohy lokálnych maxim jednotlivých zložiek NPs v závislosti od rôznych separácií NPs pre všetky druhy usporiadania

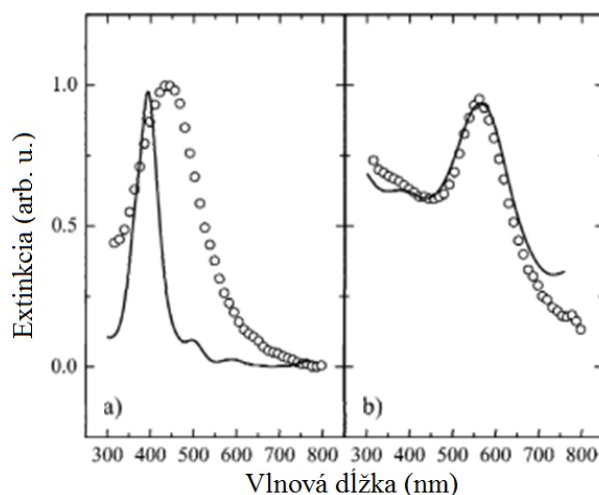
Obrázok 12 ilustruje vplyv separácie NPs na priebehy plazmonických rezonancií. Pre obe lokálne maximá v každom usporiadaní NPs je pozorovateľný tzv. „modrý posun“ vlnovej dĺžky, kedy sa poloha lokálneho maxima posúva v spektre do oblasti kratších vlnových dĺžok so zvyšujúcou sa separáciou NPs. Zvýšením separácie NPs rozumieme zníženie hustoty NPs v roztoku. Z priebehov je pozorovateľná rôzna veľkosť spektrálneho posunu lokálnych maxim pre rôzne usporiadania. Závislosti polohy lokálnych maxim príznačné pre Au pre všetky usporiadania NPs sú vynesené na obr. 12d), pričom závislosti polohy maxim príznačné pre Ag sú vynesené na obr. 12e). Na daných obrázkoch sú vynesené závislosti polohy lokálnych maxim od separácie NPs taktiež pre roztoky s NPs zloženými so samostatných Au alebo Ag. Pre tieto roztoky sa na obr 12 nenachádzajú extinkčné spektrá.

Pre nízke hodnoty separácií NPs sa polohy lokálnych maxim plazmonických rezonancií jednotlivých usporiadaní od seba nelíšia. Avšak so zvyšovaním separácie NPs dochádza k rozdielom v polohách lokálnych maxim plazmonických rezonancií pre jednotlivé usporiadania NPs. Roztok nanočastíc zložený zo zmiešaných NPs vytvorených z čistého Au a Ag závislosťou lokálnych maxim pre Au a Ag sleduje závislosť maxim plazmonických rezonancií pre roztok, v ktorom sa nachádzajú NPs zložené z čistého Au pre prípad lokálneho maxima zodpovedajúceho Au v roztoku so zmesou NPs a z čistého Ag pre prípad lokálneho maxima zodpovedajúceho Ag. Porovnaním týchto priebehov a na základe ich rozdielov pre malé koncentrácie NPs je možné odlišiť usporiadanie NPs zložených zo zmesi Au a Ag NP od zvyšných dvoch usporiadaní.

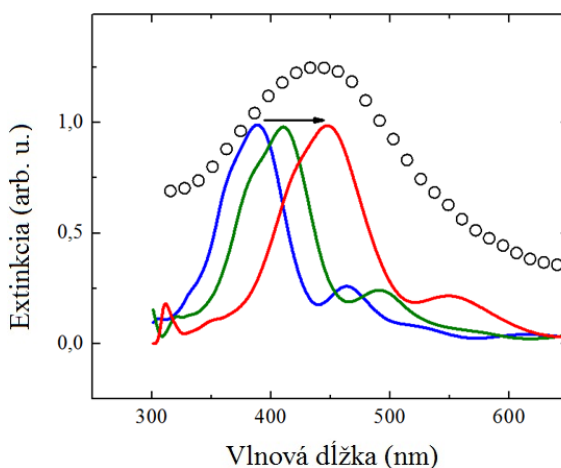
Tento prístup rozlišovania NPs je aplikovateľný len pre prípady sférických NPs. NPs rôznych iných tvarov, akými sú napríklad nanostĺpiky prinášajú ďalšie stupne voľnosti vplyvajúce na priebehy plazmonických rezonancií a polohy lokálnych maxim [24-26].

Obrázok 13 ukazuje porovnanie medzi výsledkami dosiahnutými pomocou experimentu a simulačnými výsledkami. Pre porovnanie zlatých nanočastíc dochádza k zhode polohy rezonančného maxima, avšak z porovnania pre strieborné nanočastice vychádza odchýlka na úrovni 50 nm. Na základe týchto výsledkov je možné prehlásiť, že objemové zlato sa svojimi disperznými vlastnosťami zhoduje so zlatými nanočasticami s priemerom menším ako 10 nm. Je známe, že striebro ľahko oxiduje [27]. Oxidácia striebra silno vplýva na optické vlastnosti vrstvy strieborných nanočastíc [28]. Materiálové zloženie zlatých a strieborných nanočastíc bolo skúmané pomocou Röntgenovej (X-ray) difrakcie. Z týchto meraní vyplýva, že vrstva zlatých nanočastíc je zložená len z Au a nenesie stopy iných chemických prvkov, kdežto vrstva zložená zo strieborných nanočastíc je obohatená aj oxidom striebra Ag_2O [29].

Zmena hodnôt disperzných vlastností striebra spôsobí vo výsledku simulácie posun polohy plazmonickej rezonancie (obr. 14). Takýmto spôsobom je možné určiť disperzné vlastnosti zoxidovaných strieborných nanočastíc pri dosiahnutí polohy plazmonickej rezonancie zhodnej s experimentálnymi výsledkami.



Obr. 13 Plazmonická rezonancia vrstvy a) strieborných b) zlatých nanočastíc. Plné čiary reprezentujú výsledky získané simuláciami, krúžky reprezentujú namerané dáta.



Obr. 14 Pohľad na plazmonickú rezonanciu pre vrstvu Ag nanočastíc v porovnaní s nasimulovanými plazmonickými rezonanciami Ag nanočastíc s disperznými vlastnosťami určujúcimi stupeň oxidácie striebra smerom doprava. Úroveň rezonancie získanej experimentom nie je v mierke s úrovňou rezonancie získanej simuláciou.

4.6 Simulácie OLED

Na základe štandardného návrhu štruktúry (obr. 15) bola namodelovaná OLED s jednotlivými vrstvami v prostredí RsoftCAD. Vrstvy boli namodelované s dodržaním presných hrúbok, aby odzrkadľovali čo najvernejšie reálnu štruktúru OLED. Pre potreby simulácie bolo potrebné

zadefinovať parametre simulačnej domény a vlastnosti vstupného poľa ako aj monitora na meranie optického výkonu, z ktorého boli následne určené vyžarovacie charakteristiky OLED.

$n = 1.52, k = 0$	Sklo/Parylén (makroskopické)
$n = 2, k = 4 \times 10^{-4}$	ITO (100 nm)
$n = 1.65, k = 2 \times 10^{-2}$	PEDOT:PSS (50 nm)
$n = 1.77, k = 0$	a-NPD (50 nm)
$n = 1.75, k = 0$	Alq3 (50 nm) Emisná vrstva
$n = 1.01, k = 6.62$	Al (100 nm)

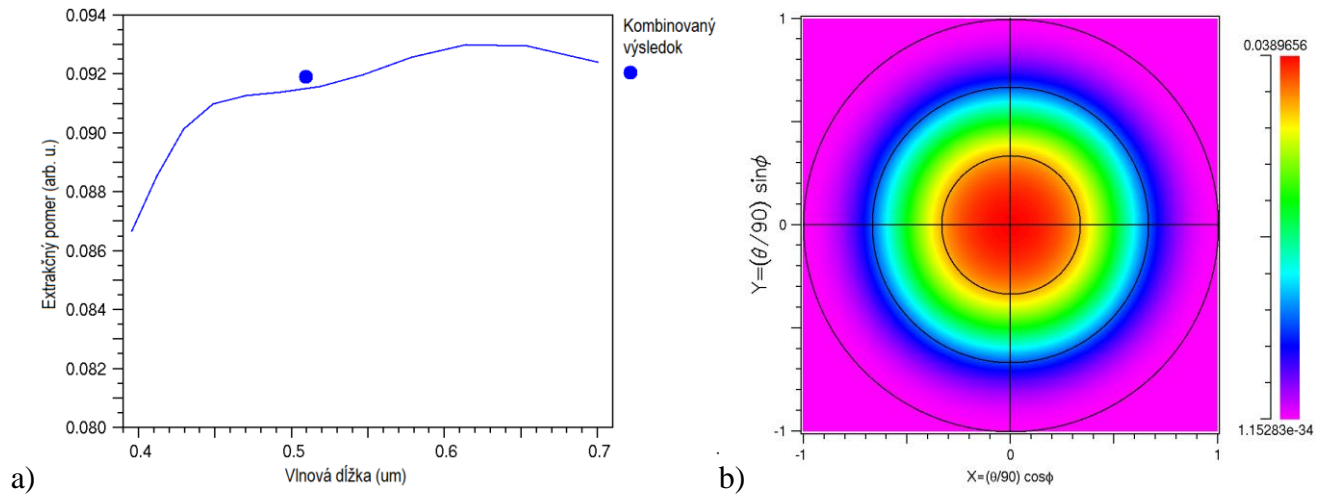
Obr. 15 Celková štruktúra OLED s jednotlivými vrstvami presne definovaných hrúbok a materiálových parametrov navrhnutá pre potreby simulácie vlastností OLED.

Na to, aby bolo možné spoľahlivo odsimulovať optický prvok akým je LED/OLED, je potrebné ako vstupné pole použiť priestorovo nekoherentné a nepolarizované žiarenie. Priestorová nekoherencia sa vytvorí pomocou koherentných simulácií jednotlivých nepolarizovaných bodových zdrojov. Z nekoherentnej kombinácie výsledkov čiastkových koherentných simulácií vyplýva výsledok simulácie, zodpovedajúci simulácii s priestorovo nekoherentným vstupným optickým žiarením. Pre vykonanie koherentnej simulácie s bodovým nepolarizovaným vstupným poľom je potrebné vytvoriť zdroj nepolarizovaného žiarenia. To je možné vytvoriť pomocou nekoherentnej kombinácie výsledkov simulácií, kedy vstupné pole je vytvorené tromi ortogonálnymi dipólmi.

Jedným z dôležitých parametrov simulácie sú okrajové podmienky simulačnej domény. Pri simuláciách LED a OLED prvkov je špecifické, že spodný kontakt je tvorený kovovou vrstvou, ktorá plní okrem funkcie napájania OLED aj funkciu zrkadla pre odraz vygenerovaného žiarenia opačným smerom. V návrhu simulácie je kovový kontakt nahradený okrajovou podmienkou, ktorá zabezpečuje vo výpočte mechanizmus odrazu žiarenia. Okrajové podmienky okrajov a vrchnej strany simulačnej domény plnia funkciu absorpcie žiarenia bez akéhokoľvek odrazu žiarenia naspäť do simulačnej domény, čoho následkom by bolo skreslenie výsledkov simulácií.

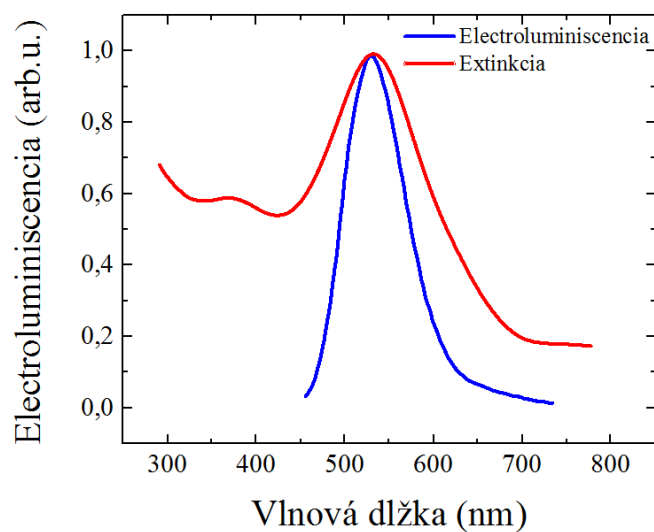
Z dôvodu dosiahnutia čo najpresnejších a najreálnejších výsledkov pri simulácii aktívneho prvku akým je OLED je potrebné vykonávať simulácie pre každú vlnovú dĺžku spadajúcu do spektra optického žiarenia zodpovedajúceho prvku. Spektrálna charakteristika slúži ako vstup pre nastavenie frekvenčného rozsahu FDTD simulácie, pričom frekvenčný rozsah FDTD simulácie ju prekrýva. FDTD simulácia pre každú frekvenciu z frekvenčného rozsahu sa nevykonáva vo forme parametrickej simulácie s meniteľným parametrom frekvencie vstupného poľa, ale ako simulácia odozvy štruktúry na impulznú povahu vstupného poľa. Takýto spôsob spektrálnej FDTD simulácie umožňuje enormné skrátenie času potrebného na vykonanie FDTD simulácie.

Výsledkom simulácie navrhutej štruktúry OLED je priebeh extrakčného pomeru žiarenia medzi žiarením „generovaným“ v aktívnej vrstve OLED a žiarením vyžiareným do požadovaného smeru (obr. 16a)). Tento priebeh charakterizuje externú kvantovú účinnosť OLED. Na obr. 16b) sa nachádza pohľad na intenzitu vzdialeného poľa navrhutej OLED. Väčšina vyžiareného výkonu sa nachádza v smere pod uhlom do hodnoty 30° od kolmice k povrchu OLED.



Obr. 16 a) Pomer extrakcie žiarenia zo štruktúry OLED do prostredia nad OLED v závislosti od vlnovej dĺžky so zobrazovaním kombinácie pre celkový pomer. b) Polárne zobrazenie intenzity vzdialeného poľa simulovanej OLED.

Vrstva kovových nanočastíc umiestnená na rozhraní vrstiev OLED je vďaka vzniku plazmonických rezonancií schopná eliminovať totálny odraz žiarenia na tomto rozhraní na základe mechanizmu vzniku rozptylových centier. Takýmto spôsobom dochádza k rozptylu žiarenia dopadajúceho na NP, čo má za následok ovplyvnenie vyžarovacej charakteristiky OLED. Zvolením NPs s určitými geometrickými parametrami je možné ovplyvňovať vyžarovaciu charakteristiku optického žiarenia v určitom spektrálnom rozsahu, ktorý určitým spôsobom koreluje s plazmonickou rezonanciou navrhnutej vrstvy NPs. Z vykonaných simulácií na štruktúrach obsahujúcich NPs rôznych parametrov vyplýva, že najväčšie prekrytie extinkcie so spektrálnou charakteristikou simulovanej OLED dosahuje vrstva pozostávajúca z Au NPs o priemer 7 nm a separáciou 2 nm. Na obr. 17 sa nachádza porovnanie priebehov extinkcie takejto vrstvy kovových NPs a nameraného priebehu spektrálnej charakteristiky Alq3.



Obr. 17 Porovnanie spektrálnych priebehov extinkcie vrstvy Au NPs s priemerom 7 nm a separáciou 2 nm s priebehom nameranej elektroluminiscencie Alq3 materiálu ako aktívnej látky OLED.

5 Hlavné prínosy dizertačnej práce

Na základe dosiahnutých výsledkov počas vypracovávania dizertačnej práce zaoberajúcej sa návrhom, simuláciami a charakterizáciou fotonických štruktúr rôznych fotonických prvkoch vhodných pre použitie v optických komunikačných systémoch môžeme prínosy zhrnúť v nasledovných bodoch:

- Návrhom vhodnej geometrie a usporiadania fotonického kryštálu v štruktúre Y-deliča bolo dosiahnuté 10 násobné skrátenie jeho dĺžky a bolo ukázané, že zmenou polohy fotonického kryštálov štruktúre Y-deliča je možné meniť jeho deliaci pomer [AFC7, AFC8, AFD6, AFD9, AFG3].
- Bol vytvorený návrh MMI deliča na materiálovom základe s vysokým kontrastom indexu lomu, čím bolo demonštrované zmenšenie potrebnej plochy pre MMI delič v porovnaní s jeho návrhom v technológii s nízkym kontrastom indexu lomu [AFC6]. Toto zmenšenie rozmerov hrá dôležitú rolu pri možnosti integrovania fotonických prvkov do fotonických integrovaných obvodov.
- Na návrhu AWG de/multiplexora s počtom kanálov 32 v technológii s vysokým kontrastom indexu lomu bolo ukázané, že aj zložitý fotonický prvok akým je 32 kanálový multiplex je schopný v technológii s vysokým kontrastom indexu lomu, vyznačujúcej sa vyššími vložnými stratami, splniť podmienky pre následné použitie v optických komunikačných systémoch [AFC5, AFC3, ADC4].
- Pri správnom návrhu geometrie fotonického kryštálu je možné využiť fotonické zakázané pásmo za účelom vytvorenia vlnovodu v štruktúre fotonického kryštálu vytvorením poruchy. Následne bol takýmto spôsobom vytvorený v štruktúre fotonického kryštálu ADD/DROP filter, na ktorom bol ukázaný možný mechanizmus snímania vlhkosti ovplyvňovaním väzby medzi vlnovodom a kruhovým segmentom ADD/DROP filtra [AFD8].
- Pomocou FDTD simulačnej metódy boli charakterizované vrstvy usporiadaných nanočastíc [AFG6]. Boli stanovené podmienky simulácie nanočastíc. Simulačne bol dokázaný vplyv oxidácie strieborných nanočastíc na priebeh plazmonickej rezonancie [ADC2, AFC11]. Pomocou simulácií s rôznym indexom lomu okolitého prostredia nanočastíc a ich rôznej separácie bol stanovený postup určovania usporiadania zlatých a strieborných nanočastíc zastúpených spoločne v jednej vrstve [ADC3, AFC9, AFG4]. Boli ukázané limity optických metód pri určovaní usporiadania nanočastíc zložených z rôznych materiálov.
- Bol popísaný postup simulácie aktívneho prvku, pričom na simulácii navrhutej OLED boli ukázané možnosti simulácie účinnosti aktívneho prvku a jeho vyžarovacej charakteristiky. Bol načrtnutý spôsob využitia nanočastíc v návrhu aktívneho prvku a ich dopad na účinnosť a vyžarovacie charakteristiky prvku.

6 Záver

V práci sa nachádzajú návrhy a simulácie vlastností progresívnych fotonických štruktúr rôznymi simulačnými metódami zohľadňujúcimi vhodnosť ich použitia a ich limity pri simuláciách konkrétnych fotonických štruktúr. Progresívne fotonické štruktúry nám umožňujú navrhnúť a vytvoriť fotonické prvky s unikátnymi vlastnosťami a lepšími parametrami v porovnaní s fotonickými prvkami pozostávajúcimi z konvenčných fotonických štruktúr.

Úvodná kapitola práce sa venuje pochopeniu problematiky šírenia sa optického žiarenia prostredníctvom fotonických štruktúr a technológii výroby vlnovodov ako základných častí, bez ktorých sa takmer žiadny fotonický prvok nezaobíde. Je ukázaná technológia výroby vlnovodov na materiálovom základe s nízkym kontrastom indexu lomu, konkrétne SOS technológia a na báze vysokého kontrastu indexu lomu, ktorý zastupuje SOI technológia. Tieto dva materiálové základy sú najpoužívanejšími materiálovými základmi pri výrobe fotonických prvkov pre OKS a prevažne na ich báze boli navrhnuté aj fotonické prvky uvádzané v práci.

Následne sú v práci predstavené a vyšetrované štruktúry s fotonickými kryštálmi a štruktúry s kovovými nanočasticami. Sú opísané ich vlastnosti a interakcie s optickým žiarením na základe ich jedinečných vlastností, ktoré sú následne odsimulované viacerými simulačnými metódami. Fotonický kryštál ukazuje svoje prednosti v schopnostiach zakázať šírenie optické žiarenie s rozsahom vlnových dĺžok spadajúcich do PBG prostredníctvom PhC, na druhej strane vrstvy obsahujúce NPs sú schopné dopadajúce optické žiarenie s vlnovou dĺžkou zhodnou s plazmonickou rezonanciou rozptýliť do rôznych smerov v závislosti od parametrov NPs.

Podstatná časť práce sa venuje využitiu týchto fotonických štruktúr pre návrh fotonických prvkov s cieľom navrhnuť fotonické prvky s lepšími vlastnosťami využiteľnými v súčasných OKS vo forme PIC. Pri každom návrhu bola vybraná vhodná simulačná metóda na simuláciu vlastností jednotlivých fotonických vrstiev a následne celkových fotonických štruktúr navrhnutých fotonických prvkov. Druh simulačnej metódy závisel od druhu simulovaných vlastností. Pre simuláciu PhC za účelom zistenia šíriacich sa módov prostredníctvom PhC a vytvorenia tak disperzného diagramu bola použitá PWE simulačná metóda. Šírenie optického žiarenia prostredníctvom deličov optického výkonu bolo simulované BPM simulačnou metódou s výnimkou šírenia sa optického žiarenia segmentu obsahujúceho PhC. Takto boli navrhnuté a simulované deliče optického výkonu v tvare Y-deliča, deliče optického výkonu využívajúce MMI člen, AWG fotonický prvok ako aj ADD/DROP filter vytvorený v PhC štruktúre.

U návrhu Y-deliča bolo ukázané ako je možné desať násobne zmenšiť veľkosť deliča, s minimálnym zvýšením vložných strát, vložení PhC do štruktúry Y-deliča. Polohou PhC v štruktúre Y-deliča je možné ovplyvňovať deliaci pomer deliča. Zmena polohy sa dá dosiahnuť pri výrobe Y-deliča zmenou súkrytu masiek samotného deliča a PhC.

Na prípade MMI deliča bolo ukázané ako materiálový základ významne ovplyvňuje rozmery fotonických prvkov. Boli porovnané návrhy MMI deličov v technológii s nízkym kontrastom indexu lomu (konkrétne SOS) ako aj v technológii s vysokým kontrastom indexu lomu (konkrétne SOI). Bolo ukázané, že v prípade technológie s vysokým kontrastom indexu lomu dochádza k vyšším vložným stratám pri manipulácii s optickým žiarením, ale podstatné je, že návrh prvku v takejto technológii zaberá neporovnateľne menšiu plochu na čipe PIC. V prípade návrhu prvku pre PIC sú celkové rozmery optických trás malé a preto dodatočné vložné straty nie sú až tak významné ako v prípade návrhu fotonických prvkov pre diaľkové prenosy.

V SOI technológii bol taktiež navrhnutý a odsimulovaný 32 kanálový AWG fotonický prvok slúžiaci pre potreby vlnového multiplexovania a demultiplexovania optických signálov v OKS. Dosiadnuté parametre navrhnutého AWG spĺňajú podmienky pre jeho použitie v OKS.

Ďalším návrhom využívajúcim progresívnu fotonickú štruktúru bol ADD/DROP filter navrhnutý v PhC štruktúre spôsobom vytvorenia porúch v PhC, za účelom využitia vlastností PBG. Bolo ukázané, že simuláciou zmeny okolitého prostredia môže byť ADD/DROP filter využitý v senzorickej aplikácii. Zmena okolitého prostredia simulujúca prítomnosť vlhkosti ovplyvní väzbu medzi vlnovodným a kruhovým segmentom, čo má za následok posun spektrálnej charakteristiky ADD/DROP filtra.

Nanoštruktúrne vrstvy tvorené kovovými NPs z materiálov s vlastnosťami umožňujúcimi vytvorenie plazmonickej rezonancie môžu byť využité na zlepšenie vlastností súčasných fotonických prvkov v OKS vplyvom plazmonickej rezonancie. Aby bolo možné navrhnuť a následne vyrobiť vrstvy z NPs s vhodnou spektrálnou charakteristikou plazmonickej rezonancie, tak je potrebné poznať vplyv vlastností NPs na ich plazmonické rezonancie. Pre simulácie plazmonických rezonancií NPs bola využitá FDTD simulačná metóda. Ako najvhodnejší materiál pre výrobu NPs vykazujúcich plazmonické rezonancie je *Au* a *Ag*. Tieto dva materiály vykazujú plazmonické rezonancie vo viditeľnej oblasti spektra. Boli porovnané priebehy extinkcií nasimulovaných NPs s nameranými priebehmi reálnych NPs vrstiev. Pokým *Au* NPs vykazovali v oboch prípadoch zhodné spektrálne charakteristiky, tak nasimulované a namerané priebehy *Ag* NPs sa nezhodovali. Nezhoda bola spôsobená simuláciou NPs z čistého *Ag*, pričom reálne *Ag* NPs majú na povrchu malú vrstvu oxidu. Prítomnosť oxidu bola dokázaná meraním Röntgenovej difrakcie vrstvy zloženej z *Ag* NPs, ako aj následnou simuláciou *Ag* s namodelovaným oxidom na ich povrchu, kedy následne došlo k zhode výsledku simulácie takýchto NPs s reálne nameranými priebehmi.

Za účelom pokrytia väčšieho spektra optického žiarenia plazmonickou rezonanciou je možné vytvoriť NPs skladajúce sa súčasne z *Au* aj *Ag*. Pre určovanie usporiadania NPs pripravených súčasne z *Au* a *Ag* boli ukázané limity meraní spektrálnych charakteristík ich plazmonických rezonancií. Na určenie usporiadania takýchto NPs je možné využiť jedinečné vlastnosti každého usporiadania z hľadiska jeho geometrie, ktoré ovplyvňujú priebehy plazmonických rezonancií a polohy lokálnych maxím plazmonických rezonancií v spektre pri zmene indexu lomu okolitého prostredia alebo zmene koncentrácie. Zmenu indexu lomu okolitého prostredia je v reálnom experimente možné dosiahnuť zmenou roztoku a určiť tak jadro/obal usporiadanie. Ďalšou možnosťou je znížiť koncentrácie NPs a identifikovať tak roztok zložený zo zmiešaných *Au* a *Ag* NPs. Pomocou spektrálnych charakteristík plazmonických rezonancií získaných optickými metódami je možné rozlíšiť jednotlivé usporiadania NPs, ale je potrebné ich hlbšie skúmanie za rôznych podmienok roztoku NPs.

Takýmto spôsobom bolo ukázané ako je možné určovať optické vlastnosti kovových nanoštruktúr rôznych parametrov pomocou simulačných nástrojov, čo je dôležité pri ich následnom využití v návrhu fotonických prvkov. Využitie NPs a ich plazmonických rezonancií je najvýznamnejšie pri vytvorení senzorickej aplikácii, kedy snímaná veličina ovplyvňuje polohu plazmonickej rezonancie a tým pádom dochádza k vytvoreniu detekovateľnej zmeny optického žiarenia šíriaceho sa štruktúrou. Ďalšou aplikáciou je použitie NPs ako rozptylových centier, čo má za následok elimináciu totálneho odrazu optického žiarenia na rozhraní optických prostredí a tým je možné za určitých podmienok dosiahnuť zvýšenie externej kvantovej účinnosti LED. Zvolením rôznych parametrov NPs je možné dosiahnuť zmenu vyžarovacej charakteristiky pre rôznu časť spektra generovaného optického žiarenia z OLED.

7 Summary

Dissertation thesis deals with the design and simulation of progressive photonic structures by the various simulation methods. Each progressive structure requires different approach to its characterization and different simulation technique has to be used. Progressive photonic structures allow designing photonic devices with the better parameters and with the smaller dimensions.

Simulated photonic structures and devices were mostly designed on the base of the waveguides fabricated in high refractive index technology (SOI). It was described technology of fabrication of waveguides in the SOI technology as well as in the low refractive index technology (SOS). These material platforms are widely used material platforms for the designing the optical waveguides. MMI splitters were designed in both material platforms. Results of BPM simulation method show that design of MMI splitter in SOI technology has only small additional insertion losses in the comparison of MMI splitter designed in the SOS technology. Dimensions of MMI splitter in the SOI technology are much smaller what is important for its integration in to photonic integrated circuits.

Photonic crystals and plasmonic nanoparticles are progressive photonic structures which were characterized by various simulation methods. Behavior of optical radiation under the interaction with these structures is interesting and it is very useful for design novel photonic devices. Photonic crystals are characterized by a photonic band gaps. PWE simulation method is most used method for determination band diagram of photonic crystals. Optical radiation with the wavelength covers by range of wavelengths under photonic band gap is disallowed in photonic crystal. This phenomenon is useful in division of optical radiation and by implementation photonic crystal with appropriate band gap in to the Y-splitter structure it leads to decreasing dimensions. It was shown comparison of conventional Y-splitter and Y-splitter with implementation of photonic crystal. The length of Y-splitter was decreased 10 times.

Photonic devices can be created in photonic crystals by omitting some segments in photonic crystals, what leads in to creation a defects in crystals and guided modes in these defects can be used. ADD/DROP filter for sensing application was designed by this method. Changing the refractive index of environment in part of ADD/DROP filter can change coupling between the waveguide and ring and spectral characteristic of filter is shifted. Spectral characteristics of ADD/DROP filter were simulated by FDTD simulation method.

Plasmonic nanoparticles consist of materials allow creation plasmonic resonance can be used for improving parameters of photonic devices. For designing structure from nanoparticles with the appropriate parameters it is important to characterize behavior of nanoparticles with interaction of optical radiation. FDTD simulation method was used for determination of plasmonic resonances of nanoparticles. Experimental results of gold and silver nanoparticles were compared with the simulation results of these nanoparticles and deviation in resonances was observed for silver nanoparticles. Simulation results showed that deviation for the silver nanoparticles was caused by oxidation. Plasmonic properties of Au-Ag nanoparticles by FDTD simulation methods were characterized and methodology of determination Au-Ag arrangement was specified. Optical radiation is scattered with interaction on nanoparticles. This can eliminated total reflection on interface of optical environments with different refractive index. It leads in to increasing external quantum efficiency of LED/OLED devices and nanoparticles can be used to influence the radiation characteristics of part of spectrum equals wavelength of plasmonic resonance.

Použitá literatúra

- [1] OKAMOTO, K. 2006. *Fundamentals of optical waveguides*. Elsevier, 2006. ISBN13: 978-0-12-525096-2.
- [2] TECHNICAL STAF OF CSELT. 1990. *Fiber Optic Communications Handbook*. edited by F. Tosco. Torino – Italy : TAB Professional and Reference Books, 1990. ISBN 0-8306-3201-8, 1990.
- [3] OU, Haiyan. 2003. Different index contrast silica-on-silicon waveguides by PECVD. In *Electronics Letters*, 2003, vol. 39, no. 2, p. 212-213.
- [4] U.S. Patent 5,888,297 *Method of fabricating SOI substrate Atsushi Ogura*, Issue date: Mar 30, 1999.
- [5] U.S. Patent 5,061,642 *Method of manufacturing semiconductor on insulator Hiroshi Fujioka*, Issue date: Oct 29, 1991.
- [6] Williams, J. 2007. *Fabrication of microphotonic waveguide components on silicon*. Thesis or Dissertation style, Dept. of Elect. and Com. Eng., Helsinki Univ., Espoo, 2007.
- [7] JOANNOPOULOS, J. D. et al. 2008. *Photonic crystal modeling the flow light*. second edition. Princeton university press, 2008. ISBN 978-0-691-12456-8.
- [8] CHEN, Y. et al. 2012. The Study of Surface Plasmon in Au/Ag Core/Shell Compound Nanoparticles. In *Plasmonics*. ISSN 1557-1963, 2012, vol. 7, no. 3, p. 509-513.
- [9] STEINBRÜCK, A. et al. 2006. Preparation and optical characterization of core–shell bimetal nanoparticles. In *Plasmonics*, 2006, vol. 1, no. 1, p. 79-85.
- [10] MAIER, S. A. et al. 2003. Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides. In *Nature materials*, 2003, vol. 2, no. 4, p. 229-232.
- [11] CHAN, G. H. et al. 2007. Plasmonic properties of copper nanoparticles fabricated by nanosphere lithography. In *Nano Letters*, 2007, vol. 7, no. 7, p. 1947-1952.
- [12] VERRE, R. et al. 2012. Self-assembled broadband plasmonic nanoparticle arrays for sensing applications. In *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, no.3, p. 031102.
- [13] XIAO, Y. et al. 2012. Surface plasmon-enhanced electroluminescence in organic light-emitting diodes incorporating Au nanoparticles. In *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 100, no. 1, p. 013308.
- [14] FUJIKI, A. et al. 2010. Enhanced fluorescence by surface plasmon coupling of Au nanoparticles in an organic electroluminescence diode. In *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 96, no. 4, p. 043307.
- [15] HSU, S.-Y. et al. 2008. Extraction enhancement in organic light emitting devices by using metallic nanowire arrays. In *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, no. 1, p. 013303.
- [16] HOBSON, P. A. et al. 2002. Surface Plasmon Mediated Emission from Organic Light-Emitting Diodes. In *Advanced Materials*, 2002, vol. 14, no. 19, p. 1393-1396.
- [17] SCHULLER, J. A. et al. 2010. Plasmonics for extreme light concentration and manipulation. In *Nature materials*, 2010, vol. 9, no. 3, p. 193-204.
- [18] SÖNNICHSEN, C. et al. 2005. A molecular ruler based on plasmon coupling of single gold and silver nanoparticles. In *Nature biotechnology*, 2005, vol. 23, no. 6, p. 741-745.
- [19] ANKER, J. N. et al. 2008. Biosensing with plasmonic nanosensors. In *Nature materials*, 2008, vol. 7, no. 6, p. 442-453.

- [20] ASLAN, K. - LAKOWICZ, J. R. - GEDDES, Ch. D. 2005. Plasmon light scattering in biology and medicine: new sensing approaches, visions and perspectives. In *Current opinion in chemical biology*, 2005, vol. 9, no. 5, p. 538-544.
- [21] ROBINSON, S. – NAKKEERAN, R. 2013. Characteristics of Add Drop Filter using single and dual PCCR in square lattice. In *Optik*, 2013, vol. 124, no. 23, p. 5918-5922.
- [22] Rsoft Design Group, *RSoft Photonics CAD Layout User Guide*, Inc., Physical Layer Division, 200 Executive Blvd., Ossining, NY 10562.
- [23] MAIER, S. A. 2007. *Plasmonics: Fundamentals and Applications: Fundamentals and Applications*. Springer, 2007. 223 p.
- [24] EUSTIS, S. - EL-SAYED, M. A. 2006. Why gold nanoparticles are more precious than pretty gold: noble metal surface plasmon resonance and its enhancement of the radiative and nonradiative properties of nanocrystals of different shapes. In *Chemical Society Reviews*, 2006, vol. 35, no. 3, p. 209-217.
- [25] LINK, S. - EL-SAYED, M. A. Spectral properties and relaxation dynamics of surface plasmon electronic oscillations in gold and silver nanodots and nanorods. In *The Journal of Physical Chemistry B*, 1999, vol. 103, no. 40, p. 8410-8426.
- [26] LEE, K.-S. - EL-SAYED, M. A. Gold and silver nanoparticles in sensing and imaging: sensitivity of plasmon response to size, shape, and metal composition. In *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, vol. 110, no. 39, p. 19220-19225.
- [27] MOORE, W. M. - CODELLA, P. J. Oxidation of silver films by atomic oxygen. In *The Journal of Physical Chemistry*, 1988, vol. 92, no. 15, p 4421-4426.
- [28] SANTILLÁN, J. M. J. et al. 2010. Determination of nanometric Ag₂O film thickness by surface plasmon resonance and optical waveguide mode coupling techniques. In *Journal of Optics*, 2010, vol. 12, no. 4, p. 045002.
- [29] AL-KUHAILI, M. F. 2007. Characterization of thin films produced by the thermal evaporation of silver oxide. In *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, vol. 40, no. 9, p. 2847.

Zoznam publikácií autora

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

Počet záznamov: 4

ADC1 Kubicová, Ivana - Pudiš, Dušan - Škriniarová, Jaroslava - Kováč, Jaroslav - Kováč, Jaroslav - Jakabovič, Ján - **Kuzma, Anton**: 2D Irregular Structure in the LED Surface Patterned by NSOM Lithography.

In: Applied Surface Science. - ISSN 0169-4332. - Vol. 269 (2013), s. 116-119

ADC2 **Kuzma, Anton** - Weis, Martin - Flickyngeroová, Soňa - Jakabovič, Ján - Šatka, Alexander - Dobročka, Edmund - Chlpík, Juraj - Círák, Július - Donoval, Martin - Telek, Peter - Uherek, František - Donoval, Daniel: Influence of Surface Oxidation on Plasmon Resonance in Monolayer of Gold and Silver Nanoparticles .

In: Journal of Applied Physics. - ISSN 0021-8979. - Vol. 112, Iss. 10 (2012), s. 103531-103535

ADC3 **Kuzma, Anton** - Weis, Martin - Daříček, Martin - Uhrík, Ján - Horínek, František - Donoval, Martin - Uherek, František - Donoval, Daniel: Plasmonic properties of Au-Ag nanoparticles: Distinctiveness of metal arrangements by optical study.

In: Journal of Applied Physics. - ISSN 0021-8979. - Vol. 115, Iss. 5 (2014), Art. No. 053517

ADC4 Seyringer, Dana - Schmid, Patrick - Bielik, Michal - Uherek, František - Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton**: Design, simulation, evaluation, and technological verification of arrayed waveguide gratings.

In: Optical Engineering. - ISSN 0091-3286. - Vol. 53, Iss. 7 (2014), Art. No. 071803

ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

Počet záznamov: 1

ADE1 Uherek, František - Chovan, Jozef - Patassy, Gábor - Pikus, Branislav - Sukuba, Jaromír - Synak, Dušan - Synak, Dušan - **Kuzma, Anton**: Projektovanie i modelovanie volokonnych breggovskich rešetok.

In: Foton-express. - No. 6 (2013), s. 24-26

AFA Publikované pozvané príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

Počet záznamov: 2

AFA1 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František: Design and Simulation of Apodized SOI Fiber to Chip Coupler by Sub-Wavelength Structure.

In: ICTON 2013 : 15th International Conference on Transparent Optical Networks. Cartagena, Spain, 23-27 June 2013. - : IEEE, 2013. - ISBN 978-1-4799-0682-6. - S. 1-4

AFA2 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František: Investigation of the Fibre to Chip Coupler Designed on SOI Platform with Subwavelength Grating.

In: ICTON 2012 : 14th International Conference on Transparent Optical Networks. Coventry, UK, 1-5 July, 2012. - Warsaw : National Institute of Telecommunications, 2012. - ISBN 978-1-4673-2227-0. - Art. No. WeC5.2

AFB Publikované pozvané príspevky na domácich vedeckých konferenciách

Počet záznamov: 1

AFB1 Uherek, František - Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Písečný, Pavol - Haško, Daniel - Seyringer, Dana: Silicon Nanophotonics.

In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. - Žilina : University of Žilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0689-3. - S. 1-6

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

Počet záznamov: 12

AFC1 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František: Design and Simulation of a Fiber to Chip Coupler Designed on SOI Platform with Subwavelength Grating.

In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. - ISSN 0277786X. - Vol. 8697 (2012), Art. No. 86971S [7] p.

AFC2 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František - Seyringer, Dana: Design and Simulation of Apodized SOI Fibre-to-Chip Coupler by Subwavelength Structure.

- In: Proceedings of SPIE. Vol. 8915 : Photonics North 2013. - [s.l.] : SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013. - ISBN 9780819497918. - Art. No. 89150P, [9] p.
- AFC3 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František: Design and Simulation of AWG on Various Material Platforms.
In: Optical Communications 2013 : 25th Conference and Exhibition. Digital Czech Republic - Optical versus FR Networks. Prague, Czech Republic, October 24-25, 2013. - Praha : ACTION M, 2013. - ISBN 978-80-86742-37-3. - S. 30-34
- AFC4 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František: Simulation of SOI Fiber to Chip Coupler with Subwavelength Grating.
In: Optické komunikace 2012 : 24th Conference and Exhibition on Optical Communications 2012. Prague, Czech Republic, October 25-26, 2012. - Prague : Action M, 2012. - ISBN 978-80-86742-36-6. - S. 58-63
- AFC5 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František: Design and Simulation of AWG for DWDM Networks.
In: Optické komunikace 2012 : 24th Conference and Exhibition on Optical Communications 2012. Prague, Czech Republic, October 25-26, 2012. - Prague : Action M, 2012. - ISBN 978-80-86742-36-6. - S. 69-73
- AFC6 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František - Seyringer, Dana: Design and Simulation of Planar Passive Optical MMI Couplers.
In: Optické komunikace 2011 : Praha, 20.-21.10.2011. - Praha : Action M, 2011. - ISBN 978-80-86742-31-1. - S. 97-100
- AFC7 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František: Design of a Planar Y-branch Optical Power Splitter with Two-Dimensional Photonic Crystal.
In: Optical Communications 2013 : 25th Conference and Exhibition. Digital Czech Republic - Optical versus FR Networks. Prague, Czech Republic, October 24-25, 2013. - Praha : ACTION M, 2013. - ISBN 978-80-86742-37-3. - S. 25-29
- AFC8 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František: Design of an Optical Power Splitter with Integrated Two-Dimensional Photonic Crystal.
In: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. - ISSN 0277786X. - Vol. 8697 (2012), Art. No. 869720, [7] p.
- AFC9 **Kuzma, Anton** - Weis, Martin - Chovan, Jozef - Uherek, František: Effect of Metal Arrangement on Localized Surface Plasmon Polaritons in Bimetallic Nanoparticles.
In: Proceedings of SPIE. Vol. 8809 : Plasmonics: Metallic Nanostructures and Their Optical Properties XI. San Diego, California, August 25-29, 2013. - [s.l.] : SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013. - ISBN 978-0-8194-9659-1. - Art. No. 88092A, [6] p.
- AFC10 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František: Fibre to Chip Grating Coupler Designed on SOI Platform with Sub-Wavelength Grating.
In: MINAP 2012 : International Conference on Micro- and Nano-Photonic Materials and Devices. Trento, Italy, January 16 - 18, 2012. - Trento : National Research Council, 2012. - ISBN 978-83-7798-020-0. - S. 167-170
- AFC11 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František - Weis, Martin: Surface Plasmon Resonance of Gold and Silver Nanoparticle Monolayers: Effect of Coupling and Surface Oxides.
In: Proceedings of SPIE. Vol. 8915 : Photonics North 2013. - [s.l.] : SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013. - ISBN 9780819497918. - Art. No. 89151N, [6] p.
- AFC12 Pudiš, Dušan - Hronec, Pavol - Kováč, Jaroslav - Lettrichová, Ivana - Škriniarová, Jaroslava - Jandura, Daniel - Slabeyciusová, Sofia - Šušlík, Luboš - Novák, Jozef - **Kuzma, Anton**: Emission Properties of Surface Patterned LEDs.
In: Proceedings of SPIE. Vol. 8816 : Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, and Devices X. San Diego, California, August 27-29, 2013. - [s.l.] : SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2013. - ISBN 978-0-8194-9666-9. - Art. No. 88161A, [6] p.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

Počet záznamov: 17

- AFD1 Chovan, Jozef - Uherek, František - **Kuzma, Anton** - Koza, Eduard - Patassy, Gábor: Design and investigation of SiO₂ slab waveguide grating for photonics sensing application.

- In: Rádioelektronika 2014 : 24th International Conference, 15-16.4.2014. – Bratislava : STU v Bratislave, 2014. – ISBN 978-1-4799-3713-4
- AFD2 Chovan, Jozef – **Kuzma, Anton** – Uherek, František – Seyringer, Dana – Patassy, Gábor: Fotonické senzory pre životné prostredie – monitorovanie kvality pitnej vody.
In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. – ISSN 1335-2547. – Roč. 19, mimoriadne č. : ELOSYS, Trenčín, 15.-18.10.2013 (2013), s. 40-43
- AFD3 Chovan, Jozef - Uherek, František - **Kuzma, Anton** – Patassy, Gábor: Syntéza FBG z nameraných dát.
In: Fotonika 2014 : 9. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, 30.-31.1.2014. - Bratislava : STU v Bratislave, 2014. - ISBN 978-80-970493-6-2. - S. 19-22
- AFD4 Chovan, Jozef - Uherek, František - **Kuzma, Anton** - Patassy, Gábor - Pikus, Branislav - Sukuba, Jaromír - Múčka, Marek: Meranie prenosových parametrov prvkov a štruktúr pre integrovanú fotoniku.
In: Nano a SMART technológie : Bratislava, 12.decembra 2012. - Bratislava : Laser Centre, 2012. - ISBN 978-80-970493-4-8. - S. 27-32
- AFD5 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František - Seyringer, Dana: Návrh a simulácia fotonických senzorov.
In: ELOSYS. Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2012 [elektronický zdroj] : Trenčín, 9.-12.10.2012. - Bratislava : FEI STU, 2012. - ISSN 1335-2547. - CD-ROM, s. 95-99
- AFD6 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František: Návrh a simulácia pasívnych fotonických štruktúr.
In: Fotonika 2013 : 8. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, 14.-15.2.2013. - Bratislava : STU v Bratislave, 2013. - ISBN 978-80-970493-5-5. - S. 66-69
- AFD7 Chovan, Jozef – Uherek, František – Patassy, Gábor – Pikus, Branislav – Sukuba, Jaromír – Múčka, Marek – **Kuzma, Anton**: Návrh a simulácia vláknových braggových mriežok.
In: Nano a SMART technológie : Bratislava, 12.decembra 2012. – Bratislava : Laser Centre, 2012. – ISBN 978-80-970493-4-8. – S. 23-26
- AFD6 **Kuzma, Anton** – Uherek, František: Design of an Optical Power Splitter with Integrated Two-Dimensional Photonic Crystal.
In: ELITECH'12 [elektronický zdroj] : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22 May 2012. – Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2012. – ISBN 978-80-227-3705-0. – CD-ROM, [4] s.
- AFD7 **Kuzma, Anton** – Uherek, František: Modelovanie a simulácia vlastností VCSE laserov s nanoštruktúrou.
In: ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011. – Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2011. – ISBN 978-80-227-3508-7. – S. 436-441
- AFD8 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František: ADD/DROP filter vytvorený v PhC štruktúre ako senzor merania vlhkosti.
In: Fotonika 2014 : 9. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, 30.-31.1.2014. - Bratislava : STU v Bratislave, 2014. - ISBN 978-80-970493-6-2. - S. 19-22
- AFD9 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František: Návrh a simulácia deliča optického výkonu s využitím 2D fotonického kryštálu.
In: Fotonika 2013 : 8. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, 14.-15.2.2013. - Bratislava : STU v Bratislave, 2013. - ISBN 978-80-970493-5-5. - S. 70-73
- AFD10 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Haško, Daniel - Uherek, František: Numerické modelovanie pasívnych fotonických štruktúr.
In: Fotonika 2012 : 7.výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Bratislava, 9. 2. 2012. - Bratislava : STU v Bratislave, 2012. - ISBN 978-80-970493-3-1. - S. 6-10
- AFD11 **Kuzma, Anton** - Uherek, František - Koza, Eduard - Seyringer, Dana - Patassy, Gábor - Pikus, Branislav - Sukuba, Jaromír - Múčka, Marek - Chovan, Jozef: Výroba a využitie Braggových mriežok v optických vláknach.
In: Nano a SMART technológie : Bratislava, 12.decembra 2012. - Bratislava : Laser Centre, 2012. - ISBN 978-80-970493-4-8. - S. 18-22

- AFD12 Písečný, Pavol - Vincze, Andrej - **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Haško, Daniel - Michalka, Miroslav - Držík, Milan - Uherek, František: Příprava fotonických prvků v nanotechnologickom laboratóriu STU - MLC.
In: Fotonika 2013 : 8. výročný vedecký seminár Medzinárodného laserového centra. Senec, 14.-15.2.2013. - Bratislava : STU v Bratislave, 2013. - ISBN 978-80-970493-5-5. - S. 37-42
- AFD13 Seyringer, Dana - Uherek, František - Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton**: Design, Simulation and Evaluation of AWG Based Demultiplexers.
In: ASDAM 2012 : 9th International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Smolenice, Slovak Republic, November 11-15, 2012. - Piscataway : IEEE, 2012. - ISBN 978-1-4673-1195-3. - S. 303-306
- AFD14 Seyringer, Dana - Kohler, L. - Uherek, František - Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton**: Influence of Waveguide Structure on Y-Branch Splitting.
In: ADEPT 2013 : 1st International Conference on Advances in Electronic and Photonic Technologies. Nový Smokovec, High Tatras, Slovakia, June 2-5, 2013. - Žilina : University of Žilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0689-3. - S. 266-269
- AFD15 Uherek, František - Chovan, Jozef - Šatka, Alexander - Písečný, Pavol - **Kuzma, Anton**: Fotonika a ochrana životného prostredia.
In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 17, mimoriadne č. : ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011 (2011), s. 29-33

AFG Abstrakty príspevkov zo zahraničných konferencií

Počet záznamov: 6

- AFG1 Chovan, Jozef - Uherek, František - **Kuzma, Anton**: Design and Simulation of a Fiber to Chip Coupler Designed on SOI Platform with Subwavelength Grating.
In: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics : Book of Abstracts. Ostravice, Czech Republic, September 3-7, 2012. - Olomouc : Palacký University, 2012. - ISBN 978-80-244-3193-2. - S. 72
- AFG2 Chovan, Jozef - **Kuzma, Anton** - Uherek, František: Design and Simulation of the SOI Fibre to Chip Surface Grating Coupler Apodized and Chirped by Subwavelength Structure.
In: Photonics North 2013 : Ottawa, Canada, June 3-5, 2013. - Ottawa : Carleton University, 2013. - S. 174
- AFG3 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František: Design of an Power Splitter with Integrated Two-Dimensional Photonic Crystal.
In: 18th Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics : Book of Abstracts. Ostravice, Czech Republic, September 3-7, 2012. - Olomouc : Palacký University, 2012. - ISBN 978-80-244-3193-2. - S. 89
- AFG4 **Kuzma, Anton** - Chovan, Jozef - Uherek, František - Weis, Martin: Surface Plasmon Resonance of Gold and Silver Nanoparticle Monolayers: Effect of Coupling and Surface.
In: Photonics North 2013 : Ottawa, Canada, June 3-5, 2013. - Ottawa : Carleton University, 2013. - S. 309
- AFG5 Škriniarová, Jaroslava - Pudiš, Dušan - Kubicová, Ivana - **Kuzma, Anton** - Kováč, Jaroslav - Hronec, Pavol - Šušlík, Ľuboš: Predefined Structures in LED Surface for Modification of Radiation Characteristics.
In: IVC - 19th International Vacuum Congress : Paris, France, September 9-13, 2013. - [s.l.] : IUUSTA, 2013. - S. 526-527
- AFG6 Weis, Martin - **Kuzma, Anton** - Chlpík, Juraj - Flickyngerová, Soňa - Jakobovič, Ján - Cirák, Július: Surface Plasmon Resonance of Nanoparticle Langmuir Blodgett Monolayers and Multilayers: Experiment and Simulation.
In: 14th International Conference on Organized Molecular Films - ICOMF14 : Paris, France, July 10-13, 2012. - Paris : Université Paris Descartes, 2012. - o-022

Ohlasy na publikácie autora

Publikácia:

Anton Kuzma, Martin Weis, Sona Flickyngerova, Jan Jakabovic, Alexander Satka, Edmund Dobrocka, Juraj Chlpik, Julius Cirak, Martin Donoval, Frantisek Uherek, Daniel Donoval, "Influence of surface oxidation on plasmonic resonance in monolayer of gold and silver nanoparticles", *Journal of Applied Physics* **112**, 103531/1 – 103531/5 (2012).

Citovaná v:

1. Sanz JM, Ortiz D, de la Osa RA, Saiz JM, González-Fernández F, Brown AS, Losurdo M, Everitt H, Moreno F, „UV Plasmonic Behavior of Various Metal Nanoparticles in the Near- and Far-Field Regimes: Geometry and Substrate Effects“, *Journal of Physical Chemistry C*, **117**, 19606 (2013).
2. Alissawi N, Peter T, Strunskus T, Ebbert C, Grundmeier G, Faupel F, „Plasma-polymerized HMDSO coatings to adjust the silver ion release properties of Ag/polymer nanocomposites“, *Journal of Nanoparticle Research*, **15**, 2080 (2013).
3. Gorham JM, Rohlfing AB, Lippa KA, MacCuspie RI, Henmnati A, Holbrook RD, „Storage Wars: how citrate-capped silver nanoparticle suspensions are affected by not-so-trivial decisions“, *Journal of Nanoparticle Research*, **16**, 2339 (2014).
4. Ruffino F, Piccitto G, Grimaldi MG, „Simulations of the Light Scattering Properties of Metal/Oxide Core/Shell Nanospheres“, *Journal of Nanoscience*, **2014**, 407670 (2014). (*nonSCI citation*)

Publikácia:

Ivana Kubicová, Dušan Pudiš, Jaroslava Škriniarová, Jaroslav Kováč, Jaroslav Kováč, Ján Jakabovič, Anton Kuzma, "2D Irregular Structure in the LED Surface Patterned by NSOM Lithography", *Applied Surface Science* **269**, 116-119 (2013).

Citovaná v:

1. J. Anshuman Das, Ravichandran Shiovanna, K. S. Narayan, „Photoconductive NSOM for mapping optoelectronic phases in nanostructures“, *Nanophotonics* **3**, 19-31 (2014).
2. WU, Chun-Ying; LEE, Yung-Chun. „Apertureless beam pen lithography based on fully metal-coated polyurethane-acrylate (PUA) pyramidal microstructure array“, *Optics Express* **22**, 10593-10604 (2014).

Autor: Ing. Anton Kuzma

Názov práce: Fotonické prvky pre optické komunikačné systémy

Náklad: 35 ks

Dizertačná práca spolu s autoreferátom je uložená na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave

