

Modelování světla v mikro- či nanostrukturách

Jiří Beran, Miroslav Hanzelka, David Roesel
VOŠ a SPŠE Olomouc, Gymnázium Česká Lípa, PORG Libeň
mr.beba@gmail.com, mirdahanzelka@seznam.cz, roesel@gmail.com

Abstrakt:

V práci jsme se zabývali modelováním pohybu světla v nanostrukturách, především ve vlnovodech. Zvláštní pozornost jsme věnovali optickým vláknům, u nichž jsme zkoumali jejich vlastnosti z hlediska kvality přenosu informací. Dále jsme vytvořili počítačový model frekvenčního filtru a v programu Omnisim jsme navrhli nanostrukturu a studovali jsme její transmisní spektrum. Zkoumané modely jsme porovnávali s komerčně využívanými komponenty.

1 Úvod

Chování elektromagnetického vlnění v nanostrukturách se velmi liší od běžně pozorovaných makroskopických světelných jevů, přestože se řídí stejnými fyzikálními zákony. Přitom porozumění šíření světla na mikroskopických měřítkách je důležité při studiu optických vláken a vlnovodů obecně.

K modelování chování světla ve vlnovodech jsme využívali různé nástroje. Na simulace 2D vlnovodů nám postačil nástroj F2P, grafický výstup z něj jsme zpracovávali pomocí MATLABU. Odzkoušeli jsme tak několik konfigurací kruhových mikrozónátorů, z nichž jsme sestavovali filtry určitých frekvencí spektra. Pro modelování optických vláken, toku světla v nich a znázornění intenzity na průřezu jsme už používali program Fimmwave od společnosti PhotonDesign® a na simulaci průchodu světla nanostrukturami a jevy na rozhraní kovu a dielektrika program OmniSim od stejné firmy.

2 Šíření světla

Maxwellovy rovnice jsou základní zákony v teorii elektromagnetického pole. Popisují chování elektromagnetických vln a lze je zapsat buď v diferenciálním nebo v integrálním tvaru. Diferenciální tvar:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{ext.}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J}_{ext} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Řešení Maxwellových rovnic vyžaduje splnění určitých okrajových podmínek, které jsou velmi citlivé na počáteční hodnoty veličin, což se projevilo při našich experimentech.

Ze Snellova zákona vyplývá, že pokud světlo dopadá na rozhraní pod větším než mezním úhlem, dochází k totálnímu odrazu (modul reflektance však neroste spojitě – intenzita odražené části magnetické složky světla klesá až k Brewsterově úhlu a teprve poté strmě narůstá). Avšak i při totálním odrazu projde zlomek elektromagnetického záření přes

rozhraní, a to ve formě evanescentní vlny, jejíž intenzita sice exponenciálně klesá, ale i přesto je tato ztráta při přenosu paprsků vlnovody významná.

Vlna šířící se po rozhraní dvou látek s opačnými znaménky permitivit se nazývá povrchový plazmon. Studování tohoto jevu nám umožňuje určovat schopnost látek vázat biopolymery, což nachází využití hlavně ve farmakologii. Obvykle se v laboratořích využívá rozhraní vzduch/zlato, protože tento kov má dobré optické a chemické vlastnosti (je biokompatibilní).

3 Vlnovody

Konstrukce vlnovodu

Vlnovody jsou běžně založeny na rozdílu indexů lomu jádra a obalu. V případě, že je vlákno komplikovanější, může být problematické přesně označit, jaká část je jádro, vedení světla však funguje na identickém principu. Vlnovodů existuje několik typů, od planárních (integrováné obvody), přes kanálkové až po klasické optické vlákno. Vlákna se mimo jiné můžou lišit také v rozložení indexu lomu – jednotlivé složky se od sebe můžou lišit skokově (tzv. step-index vlákna) nebo postupně díky snižování míry dopace skla (tzv. gradientní vlákna).

K výrobě vláken se používá zpravidla dopované sklo, většinou germaniem. U vláken je třeba dodržovat extrémní čistotu (1 ppb), jelikož s každou příměsí rapidně stoupá absorpce a tím pádem i útlum s časem. Jednou z nejvýraznějších hrozeb je voda, respektive její OH^- ionty, které rapidně zvyšují absorpci a zhoršují tak přenosové vlastnosti vlákna.

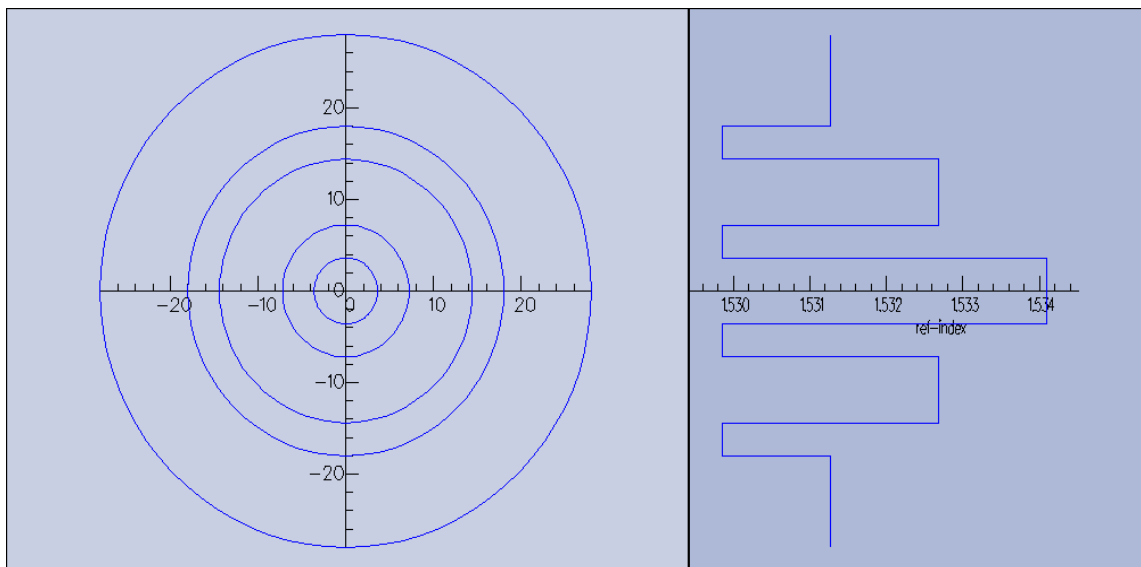
Vlákna se vyrábí z pevné preformy větších rozměrů, vytvořené z materiálů kýžených vlastností. Ta se následně taví a za využití gravitace se mění na mikrovlákno s identickými poměry látek jako v preformě, které následně chladne a dále se zpracovává.

Vedení světla ve vlnovodu

Při průchodu pulsu vlnovodem se paprsek vlivem disperze rozloží na více módů (vidů), které mají různě velkou konstantu šíření $k = \frac{2\pi}{\lambda}$. Proto dochází k jejich zpoždování, což znemožňuje přečtení informace poslané optickým vláknem. K disperzi dochází i v rámci jednotlivých módů – není možné poslat dostatečně silný pulz, aniž by došlo k rozšíření spektra. Proto je potřeba i u single módové vlákna přibližně každých 80 km signál obnovit, ačkoli ještě nedošlo k výraznému útlumu. Druhou možností je neomezovat frekvenci počtem módů, což ale vyžaduje použití vlákna s gradient-indexem.

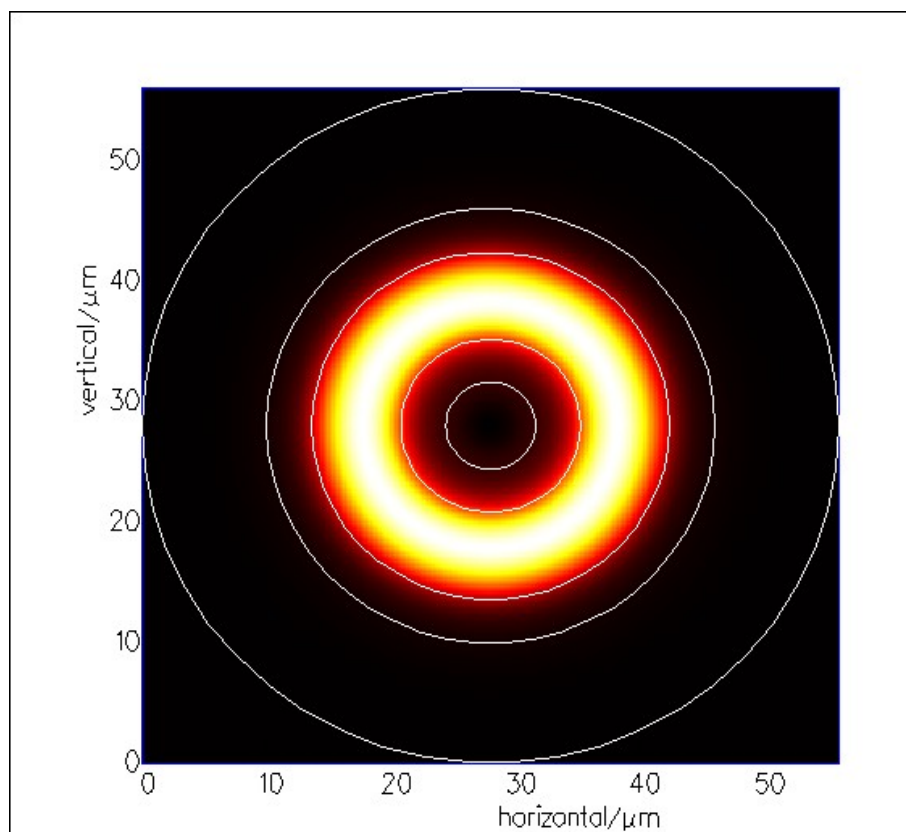
4 Modelování průřezu optického vlákna

Jako první jsme modelovali step-indexové optické vlákno pomocí programu FimmWave a snažili se napodobit vlastnosti vlákna zdokumentovaného ve článku [2], které mimo jiné vynikalo plochou disperzní křivkou a tím pádem i nízkou hodnotou útlumu na konkrétním rozsahu vlnových délek. Na Ilustraci 1 je znázorněn průřez modelovaného vlákna.



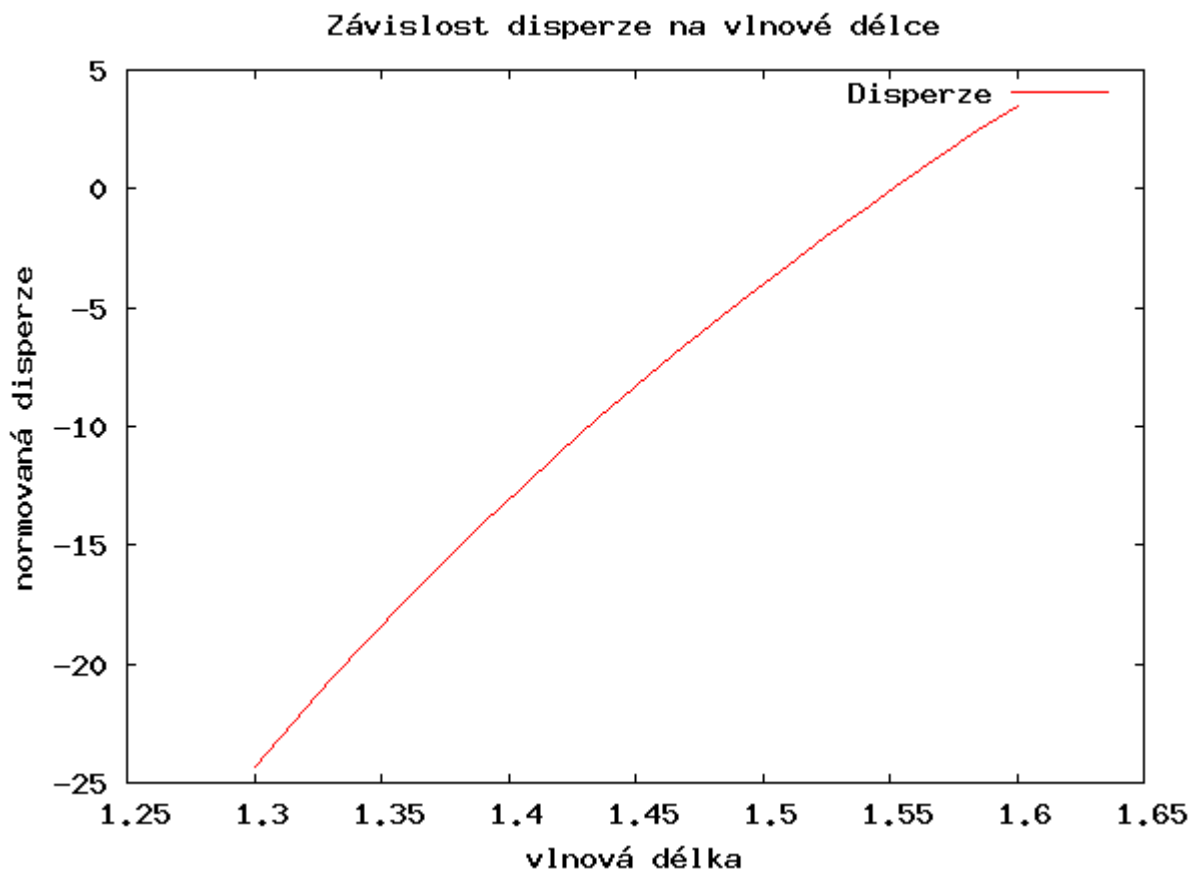
Ilustrace 1: Průřez single-mode optického vlákna

Vlákno je rozděleno na 5 vrstev, které mají rozdílné indexy lomu, což má vliv na šíření vlny. Naším cílem bylo najít základní mód, který by procházel středem vlnovodu.



Ilustrace 2: Rozložení intenzity základního módu

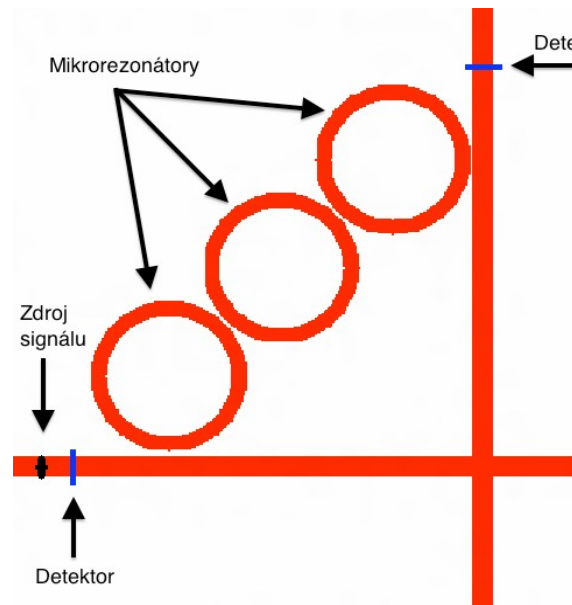
Na Ilustraci 2 je vidět, že veškerá energie sice prochází třetí vrstvou, ale bez většího útlumu. Disperzní křivka by se měla ideálně pohybovat okolo hodnoty 0 pro vlnovou délku $1,55 \mu\text{m}$. To, jak znázorňuje následující graf, základní mód modelovaného vlnovodu splňuje, jedinou vadou je prudký růst křivky.



5 Rezonance ve vlnovodech

Dále jsme se věnovali 2D simulacím vlnovodů v programu F2P [1]. Výsledný model sestával ze tří kruhových mikrorezonátorů a dvou na sebe kolmých vlnovodů – toto uspořádání tvoří frekvenční filtr, tj. komponent sloužící k rozdělení módu podle frekvencí. Data z tohoto programu jsme zpracovávali v programu MATLAB, díky kterému jsme zjistili, jak světlo v našem filtru prochází a zda je distribuce jednotlivých částí spektra efektivní.

Mikrorezonátory nacházejí uplatnění při zpracování opticky přenášených informací. V praxi se často využívá soustava vertikální, nikoli planární.



Ilustrace 3: Frekvenční filtr

6 Modelování lokalizovaných plazmonů

V programu OmniSim jsme modelovali vznik plazmonů na různě tvarovaných nanostrukturách ze zlata. Metodou leptání jsme vytvořili tvar osmicípé hvězdy, podkladem bylo sklo, vyslaný puls měl vlnovou délku 633 nm. Index lomu okolí byl proměnnou veličinou. Při průchodu pulsu zvolenou strukturou docházelo ke kumulaci intenzity na ostrých hranách, které pak samostatně vyzařovaly s jinou fází. Při zvýšení indexu lomu z hodnoty 1 na 1,05 se změnilo transmisní spektrum a došlo k posunutí dipu směrem k větším vlnovým délkám.

7 Diskuse

Při návrhu single-mode vlákna podle vědeckého článku se nám nepodařilo replikovat disperzní křivku tak, aby byla dostatečně plochá v okolí nuly. Výsledek však nebyl daleko od disperzních křivek běžně používaných vláken.

Snaha napodobit v F2P běžně používanou součástku frekvenčního filtru byla téměř bezvýsledná, výkyvy v grafu byly evidentně zapříčiněny jinými jevy, než bylo v plánu.

Na to, že jsme při navrhování nanostruktury Au modelu vycházeli pouze z vlastní intuice, vykazovala překvapivě dobré výsledky, které se kvalitativně podobaly laboratorně zkoumaným modelům, ač nedosahovali jejich přesnosti a účinnosti.

Z důvodů omezeného času jsme část simulací prováděli pouze ve 2D a některé modely jsme nestihli propočítat do potřebných detailů, všechny však alespoň částečně vykazovaly očekávané vlastnosti.

8 Závěr

V našich simulacích jsme se snažili napodobit optimální vlnovody a struktury zdokumentované ve vědeckých článcích. Nikdy se nám sice nepodařilo přesně replikovat, nebo snad zlepšit vlastnosti modelovaných prvků, výsledky však nebyly od cíle daleko a úspěšně využívaly studovaných efektů.

Poděkování

Na prvním místě bychom chtěli poděkovat Jiřímu Slabému, garantovi našeho projektu, za konzultace a výpomoc při realizaci naší práce. Děkujeme taktéž FJFI ČVUT v Praze a organizátorům Týdne vědy, kteří nám umožnili na tomto projektu pracovat.

Reference:

- [1] M. QIU, F2P: *Finite-difference time-domain 2D simulator for Photonic devices*, <http://www.imit.kth.se/info/FOFU/PC/F2P/>
- [2] P. L. FRANCOIS: *Monomode quadruple-clad fibres* Electronic Letters, 1984 volume 20