

# Šíření světla v nanostrukturách – simulace na počítači

Eliška Jeřábková, Hana Protivová, Roman Vašut, Róbert Jurčík  
Gymnázium Bohumila Hrabala, Nymburk; Gymnázium Botičská  
Praha 1; Masarykovo gymnázium, Příbor; Gymnázium, Turzovka  
[elijerabkova@seznam.cz](mailto:elijerabkova@seznam.cz); [hanickapro@seznam.cz](mailto:hanickapro@seznam.cz);  
[roman.vasut@gypri.cz](mailto:roman.vasut@gypri.cz); [robo.jurcik@centum.sk](mailto:robo.jurcik@centum.sk)

## Abstrakt:

Tento projekt jsme si vybrali kvůli našemu zájmu o fyziku a vlnovou optiku. Cílem našeho bádání bylo rozšířit si znalosti ve vlnové optice a práci s počítačem – simulace šíření vln v nanostrukturách. Díky softwarovým programům jsme se podívali do nanosvěta, jak fungují jednotlivé programy a jak s nimi zajímavě pracovat, co nám mohou ukázat a mnohdy i barevně zajímavé výsledky.

## Úvod

V současném světě jsou nanostruktury nepostradatelnou součástí dnešních technologií, jejich využití můžeme najít například v solárních panelech, v optických vláknech a kabelech a jiné. Práce s nanostrukturami není tedy jen teoretickým úkonem, ale také praktickým.

Zabývali jsme se zkoumáním šíření světla v nanostruktuře. Zkoumání jsme prováděli s pomocí sofistikovaného softwaru pro simulaci šíření světla v nanostruktuře. Právě nanostruktury se využívají například v telekomunikaci, zpracování signálů nebo při detekci rakoviny. K práci používáme fotonické krystaly, čočky – spojky a rozptylky a také metamateriály.

## Metody

K simulování těchto nanostruktur není možné používat přístupy geometrické optiky, protože by musela být vlnová délka mnohem menší než je rozměr sledovaného objektu (+ další podmínky). Z tohoto důvodu je nutné používat přístupy vlnové optiky. Fyzika je zde popsána pomocí čtyř Maxwellových rovnic (diferenciální rovnice). Derivace jsou tu nahrazeny pomocí konečných diferencí. Tento algoritmus je počítačově implementován v programech Lumerical Finite-Difference Time-Domain Solutions a Lumerical Mode Solutions a Photon Design – OMNISIM. Další úlohou bylo zjišťování modu v optických vlnovodech (vláknech), k tomu jsme použili program Lumerical Mode Solutions.

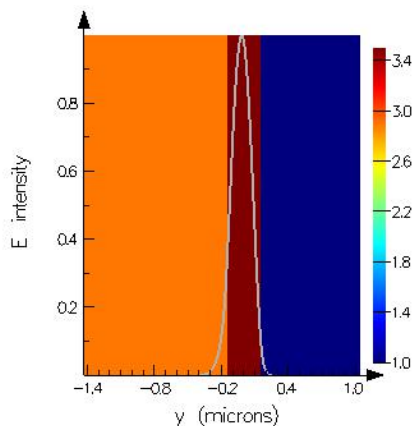
# Výsledky

## Planární vlnovod

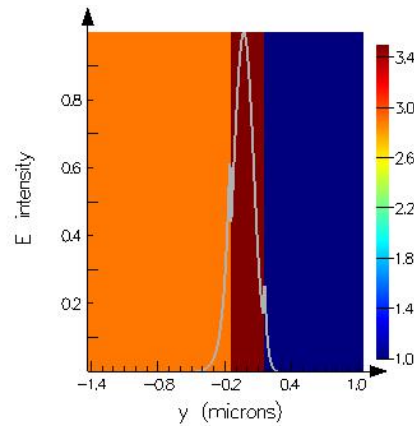
Je nejjednodušším typem optického vlnovodu. Elektromagnetické vlny – mody jsou vedeny v jádru vlnovodu, protože jádro má větší index lomu ( $=n$ ) než okolní prostředí. Mody se šíří vlnovodem rychlostí  $V_f$  určenou jeho tzv.  $n_{\text{eff}}$  (= efektivní index lomu) podle vztahu  $V_f = c/n_{\text{eff}}$ . Obecně tato konstanta může být komplexní, kde komplexní část znamená tlumení. Šíření v planárních vlnovodech lze jednoduše vysvětlit na základě totálního odrazu. K totálnímu odrazu dochází, když světlo vstupuje z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí, musí tu být splněný určitý úhel, pak se světlo 100% odrazí a nic neprojde. My jsme na problematiku nazírali z hlediska vlnové optiky, pomocí řešiče modů.

Jádro vlnovodu má index lomu 3,5 a šířku  $0,3 \mu\text{m}$ . Substrát má index lomu 2,9 a superstrát je vzduch; 1. Hledali jsme TE a TM základní mód pro vlnovou délku  $0,975 \mu\text{m}$ .

Pro zadané parametry a nastavení mode solveru (rozišení apod.) jsme získali pro tento vlnovod dva základní mody  $\text{TE}_0$  a  $\text{TM}_0$ . Základní  $\text{TE}_0$  má  $n_{\text{eff}}=3,312727$  a  $\text{TM}_0$   $n_{\text{eff}}=3,242252$ . Barevná škála ukazuje index lomu.



Obrázek 1 Elektrická intenzita modu  $\text{TE}_0$

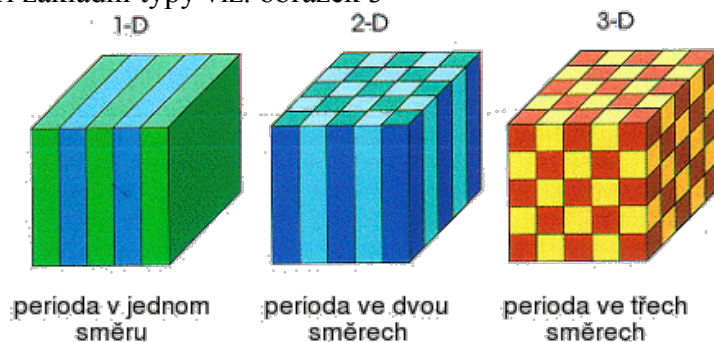


Obrázek 2 Elektrická intenzita modu  $\text{TM}_0$

Pro kontrolu jsme porovnali naše výsledky s analytickým modelem a zjistili jsme, že se naše výsledky liší od analytického řešení až na pátém desetinném místě.

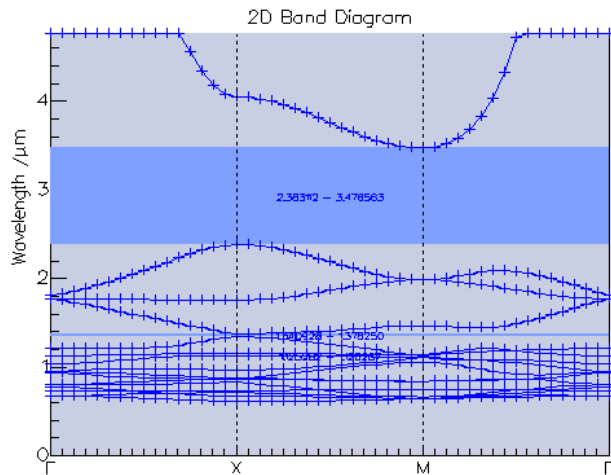
## Fotonický krystal

Fotonický krystal je materiál vykazující periodické změny index lomu světla v jednom nebo více směrech. (1) Jde o analogii klasického pevnolátkového krystalu. Dle periodičnosti existují tři základní typy viz. obrázek 3



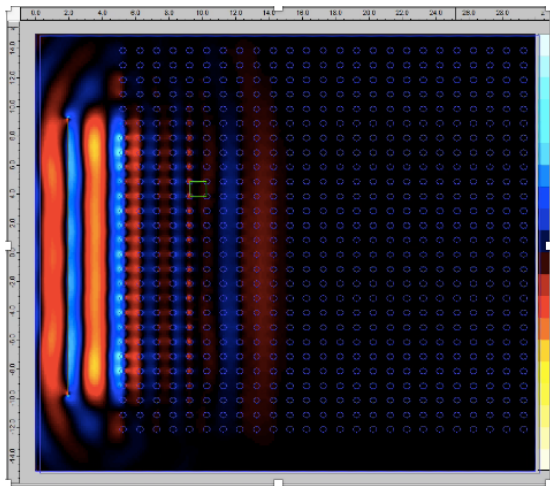
Obrázek 3 typy fotonických krystalů (2)

Fotonické krystaly mohou mít zakázaná pásma. Vlnění s vlnovou délkou zakázaného pásu se nemůže ve fotonickém krystalu šířit. Viz obrázek 4. Obrázek ukazuje TM polarizaci.

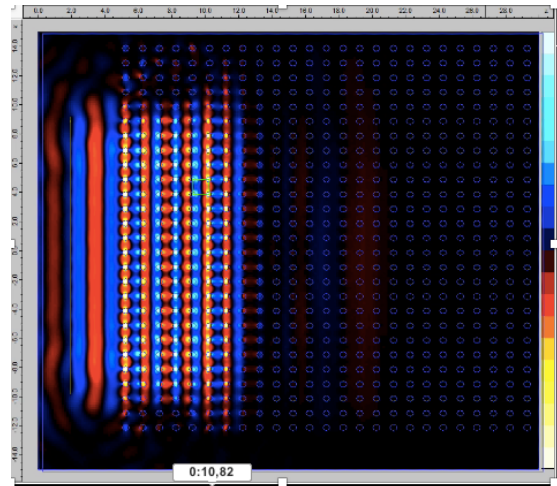


Obrázek 4 zakázaný pás – modrá oblast (2,38 – 3,47 $\mu\text{m}$ )

Náš krystal měl čtvercovou mřížku a prvky byly do tvaru kruhu. Perioda mřížky byla 1 $\mu\text{m}$ , průměr kruhu byl 0,4  $\mu\text{m}$  a kruhy mají index lomu 3,4. Ostatní je vzduch;  $n=1$ .



Obrázek 5 uvnitř zakázaného pásu  $\lambda=3\mu\text{m}$



Obrázek 6 mimo zakázaný pás  $\lambda=2\mu\text{m}$

Na obrázku č. 5 vidíme šíření vlny s vlnovou délkou uvnitř zakázaného pásu, tudíž je šíření rychle utlumeno. Zatím co na obrázku č. 6 šíření vlny není utlumeno, protože vlnová délka je mimo zakázaný pás. (Šíření s konečným časem)

Fotonické krystaly můžeme najít i v přírodě, například u některých motýlů. Jejich křídla jsou z části tvořeny chitinem. Tato látka je sama o sobě průhledná, ale kvůli geometrii ve formě fotonických krystalů dochází jak k interferenci, tak k ohybu světla, což způsobuje barevné efekty.

## Shrnutí

Podařilo se nám úspěšně nasimulovat šíření vlnění v různých nanostrukturách. Určili jsme TE a TM mody pro nanostrukturu. Pozorovali jsme jevy vytvořené daným softwarem. Nabyli jsme nových vědomostí v této zajímavé oblasti.

## Poděkování

Naše velké poděkování patří především fakultě jaderného inženýrství a Ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za možnost zúčastnit se projektu Týdne vědy na Jaderce. Naše největší díky patří vedoucím miniprojektům; Ing. Pavlovi Kwiecienovi, Ph.D.; Ing. Milanu Brudovi a doc. Dr. Ing. Ivanovi Richterovi za velkou pomoc a trpělivost s námi v době vypracování projektu. Zároveň děkujeme RNDr. Janu Proškovi za vypůjčené preparáty motýlů.

## Reference:

1. Lumerical. FDTD solution. *Lumerical* [online]. Canada, 2018, 2018 [cit. 2018-06-19]. Dostupné z: <https://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>
2. Lumerical. MODE solution. *Lumerical* [online]. Canada, 2018, 2018 [cit. 2018-06-19]. Dostupné z: <https://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>
- 3.

## Citace:

- 1) (Jasanský, 2005)
- 2) (Jasanský, 2005)