

Jak se světlo šíří a rezonuje v nanostrukturách – simulace na počítači

Kateřina Nosková¹, Marie Hledíková², Sebastian Hlavatý¹

¹ První soukromé jazykové gymnázium Hradec Králové;

Brandlova 875, Hradec Králové

² Gymnázium Velké Meziříčí;

Sokolovská 27, Velké Meziříčí

noskova.katerina@psjg-hk.cz

hledikova@gvm.cz

hlavaty.sebastian@psjg-hk.cz

Abstrakt:

Tento miniprojekt se zabývá šířením světla v klasických strukturách a nanostrukturách a modelováním pomocí numerických nástrojů. V práci je poukazováno na vliv vlnové povahy světla a ukázán příklad šíření světla ve fotonickém krystalu.

Úvod

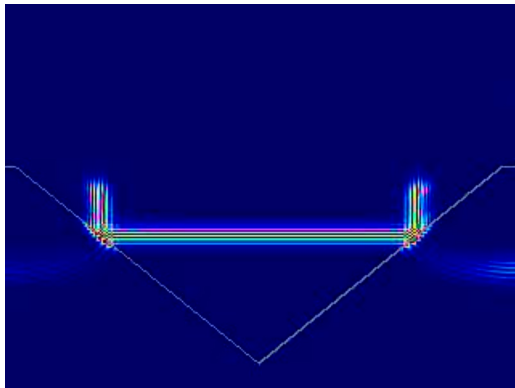
Světlo je elektromagnetické vlnění a optické vlastnosti materiálu se popisují pomocí indexu lomu. Index lomu prakticky znamená rychlost světla v materiálech a slouží také k výpočtu odrazu a lomu. Pomocí různých materiálů a struktur tak lze světlo vést a měnit jeho vlastnosti. Mezi moderní struktury, které se v poslední době používají, se řadí tzv. nanostruktury. To jsou takové struktury, které mají menší rozměry, než je vlnová délka použitého záření, takže v řádu stovek nanometrů. Mezi ně se řadí fotonické krystaly, což jsou struktury s periodickým rozložením indexu lomu, jejichž komponenty mají charakteristický rozměr menší než vlnová délka světla. Díky tomu představuje omezení pro fotony v analogii jako krystalová mříž pro elektrony.

1 Proč se používá počítačová simulace?

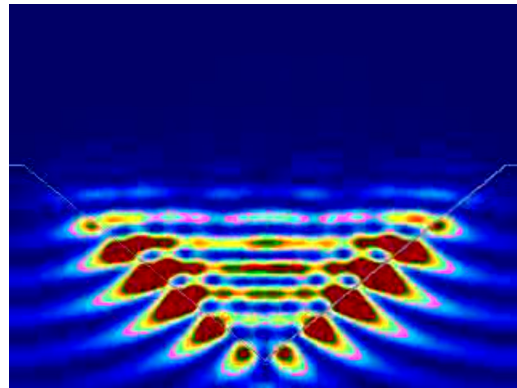
Mezi hlavní důvody užívání simulace v tomto oboru patří nákladnost a složitost výroby nanostruktur. Metoda „pokus omyl“ není přijatelná, protože funkčnost výsledné součástky by nebyla optimální nebo by součástka nemusela vůbec fungovat. Šíření světla ve strukturách, jejichž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou použitého záření, nelze popsat pomocí pravidel geometrické optiky kvůli vlnové podstatě světla. Je nutné použít Maxwellovy rovnice, které se analyticky dají vyřešit jen pro jednoduché struktury. Proto používáme simulační software.

Pro účely simulace jsme použili programy Lumerical FDTD Solutions [1] a PhotonDesign CrystalWave [2], které jsou založeny na metodě konečných diferencí v časové doméně (finite-difference time-domain – FDTD [3]).

Pro ilustraci nutnosti použití numerického modelování jsme nejprve využili příkladu, ve kterém se modeluje jev totálního odrazu. Při vlnové délce $0,4\ \mu\text{m}$ a periodě struktury $20\ \mu\text{m}$ se světlo na rozhraní mezi vzduchem ($n=1$) a křemenem ($n=1,5$) odráží podle pravidel geometrické optiky. Dochází k totálnímu odrazu (viz obrázek č. 1). Avšak při vlnové délce $4\ \mu\text{m}$ již převládají jevy vycházející z vlnové postaty světla a tudíž se nemůžeme řídit geometrickou optikou (viz obrázek č. 2).



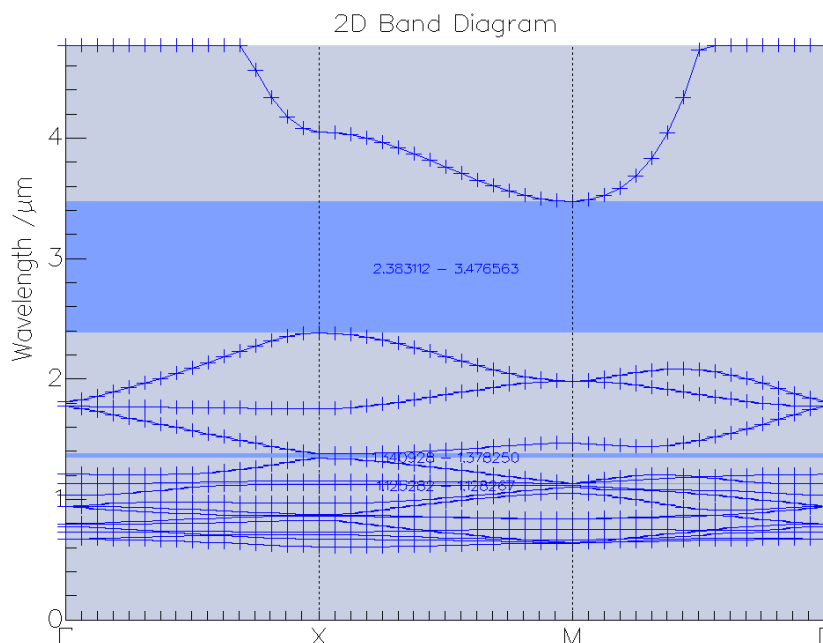
Obrázek č. 1 Nastává totální odraz



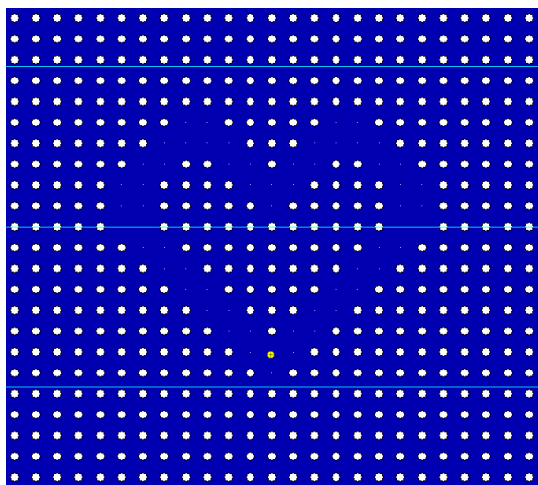
Obrázek č. 2 Nenastává totální odraz

2 Výsledky modelování

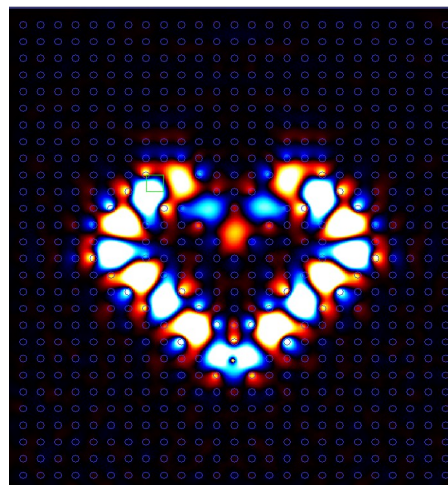
V prvním případě jsme modelovali šíření světla ve fotonickém krystalu. Zvolili jsme takovou vlnovou délku ($3\ \mu\text{m}$), která pro danou konfiguraci fotonického krystalu spadá do tzv. zakázaného pásu, který se rozkládá mezi vlnovými délkami $2,38\ \mu\text{m}$ a $3,48\ \mu\text{m}$. To znamená, že světlo o takové vlnové délce se krystalem nešíří. Toho se využívá při vytváření vlnovodů bez výrazných ztrát. A my jsme vytvořili vlnovod ve tvaru srdce (viz obrázek č. 4).



Obrázek č. 3 Pásový diagram se zakázaným pásem

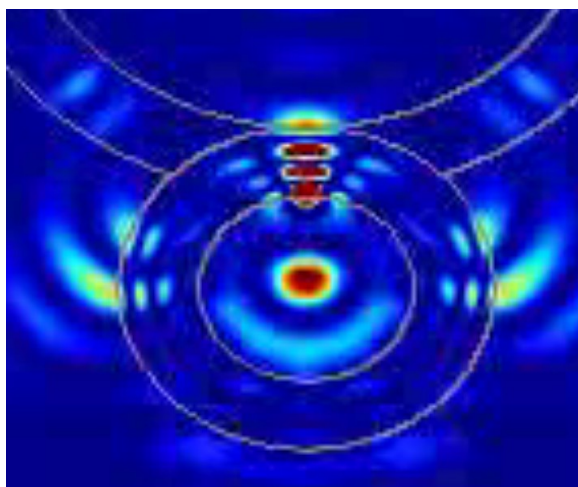


Obrázek č. 4 Vlnovod ve tvaru srdce



Obrázek č. 5 Rozložení pole

Ve speciálně vytvořené klasické struktuře se za pomoci jevu lomu světla vytvořila rezonance světelného pole ve tvaru několika kuliček. Materiál, kterým se světelná vlna šířila, měl index lomu 1,4 a kruh, do kterého vlna zaústila, měl index lomu 3. Kvůli využití pouze klasické struktury je možno vidět velký únik světla mimo vytvořené kruhy, v porovnání s použitím fotonického krystalu, kde ztráty pozorovatelné nejsou.



Obrázek č. 6 Rezonance světla

Shrnutí

Pozorovali jsme meze platnosti geometrické optiky. Zjistili jsme, že pro struktury s rozměry srovnatelnými s vlnovou délkou použitého světla je nutné využít numerické metody založené na řešení Maxwellových rovnic. Provedli jsme několik počítačových simulací.

Poděkování

Děkujeme našim supervizorům Pavlu Kwiecienovi, Janu Fialovi a Ivanu Richterovi za důkladné vysvětlení problematiky a pomoc při zpracování miniprojektu. Dále děkujeme Vojtěchu Svobodovi za organizaci celého Týdne vědy na Jaderce.

Reference:

[1] Lumerical Solutions, Inc. <http://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>

[2] Photon Design Ltd, <https://www.photond.com/products/crystalwave.htm>

[3] YEE K.: "*Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media*". IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 14 (3): 302–307, 1966.