

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

Simona Buryšková, Dominika Jurdová, Jan Kolovecký, Miroslav Müller
G. Matyáše Lercha, Brno; G. Velké Meziříčí; G. Kolín; G. Ustí n. Labem
simona.buryskova@seznam.cz; d.jurdova@seznam.cz; kulatak111@seznam.cz;
m.muller007@seznam.cz

Abstrakt:

V rámci miniprojektu jsme se zabývali šířením a rezonancí světla v nanostrukturách. Předmětem našeho zájmu byly fotonické krystaly a metamateriály. Na počítači jsme simulovali exotické jevy, jako je např. záporný index lomu, či efekt „neviditelného pláště“. Vyzkoušeli jsme také, že platnost zákonů geometrické optiky je omezená a nahrazují je zákony vlnové optiky.

1 Úvod

Nanotechnologie jsou budoucností moderního materiálového inženýrství. Zkoumání chování světla v nanostrukturách není pouze teoretickou záležitostí, ale má dnes široké uplatnění, např. solární panely, optická vlákna, zpracování optických signálů, aj.

Dnešní technologie nám umožňují zkonstruování složitějších nanostruktur, než jsou jednoduché čočky a vlnovody, jsou jimi například fotonické krystaly a metamateriály. Fotonické krystaly mají podobnou strukturu a vlastnosti jako pevnolátkové krystaly makrosvěta. Aby fungovaly, musí být jejich charakteristický rozměr srovnatelný, nebo menší než vlnová délka použitého záření. Metamateriály jsou v přírodě se nevyskytující kompozitní materiály, které mají záporné hodnoty permitivity a permeability, a tudíž i záporný index lomu.

Některé vlastnosti těchto nanostruktur jsme si ověřili v simulačních programech PhotonDesign a Lumerical.

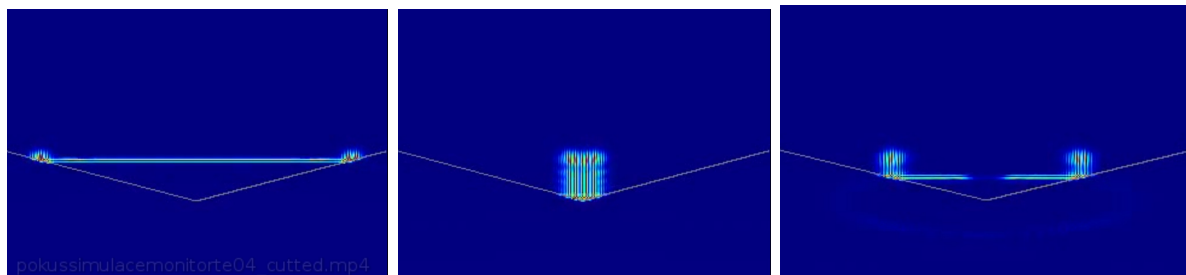
2 Simulace

Výroba fotonických struktur je finančně i časově náročná, proto se nejdříve všechny návrhy analyzují pomocí počítačových simulací. My jsme využili komerční programy PhotonDesign (www.photond.com) a Lumerical (www.lumerical.com). V rámci těchto balíčků jsme využili programy založené na metodě FDTD (finite-difference time-domain), což je metoda, která nahrazuje derivace Maxwellových rovnic pomocí konečných diferencí.

3 Limity geometrické optiky

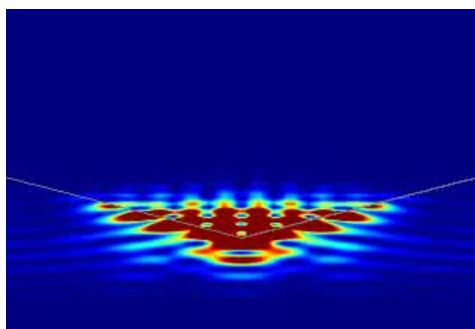
Při vlnové délce řádově srovnatelné s velikostí struktury přestává platit aproximace vlnové optiky optikou geometrickou, a je potřeba plně využít vlnovou optiku – Maxwellovy rovnice.

V simulaci za použití záření o vlnové délce $0,4 \mu\text{m}$ došlo na rozhraní mezi křemenem ($n=1,5$) a vzduchem ($n=1$) k totálnímu odrazu (obr. 1). Paprsek dopadal na rozhraní pod úhlem 45° , což je úhel větší než kritický (pro toto rozhraní $41,8^\circ$).



Obr. 1 Simulace dopadu rovinné vlny ($\lambda=0,4 \mu\text{m}$) na rozhraní křemen-vzduch, obrázky jsou zachyceny ve třech různých časových okamžicích. Platí zde zákony geometrické optiky.

Při vlnové délce $4 \mu\text{m}$, což je vlnová délka řádově srovnatelná s periodou struktury ($20 \mu\text{m}$), k totálnímu odrazu nedocházelo (obr. 2). Většina záření prošla skrz rozhraní.

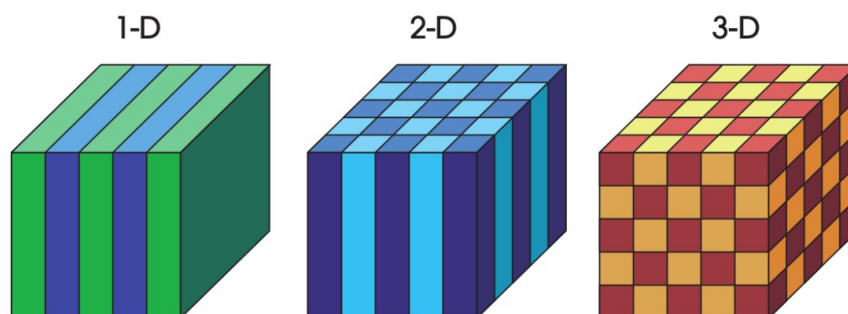


Obr. 2 Simulace dopadu rovinné vlny ($\lambda=4 \mu\text{m}$) na rozhraní křemen-vzduch. Platí zde zákony vlnové optiky.

3 Fotonické krystaly

Fotonické krystaly jsou periodické struktury, které jsou optickou analogií pevnolátkových krystalů. Podobně jako tyto pevnolátkové struktury mohou mít i fotonické krystaly tzv. zakázané pásy, což jsou intervaly vlnových délek, při nichž se elektromagnetického záření v krystalech nešíří.

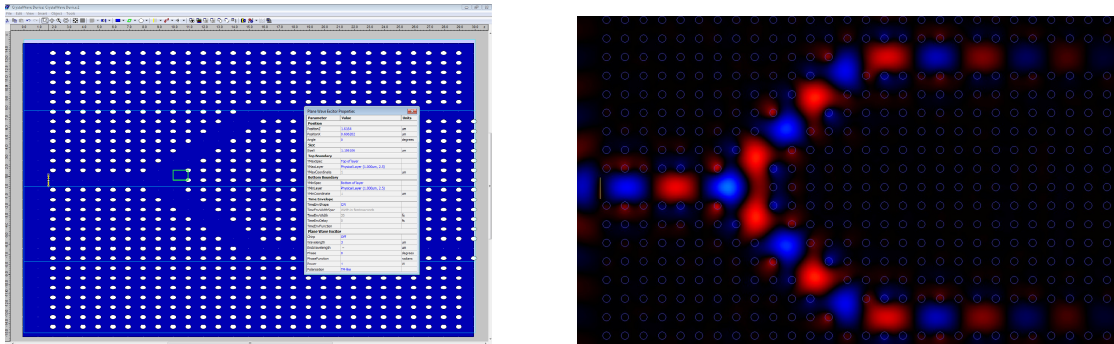
Fotonické krystaly mohou mít periodicitu v jednom, dvou nebo třech směrech, jak je znázorněno na obrázku 3.



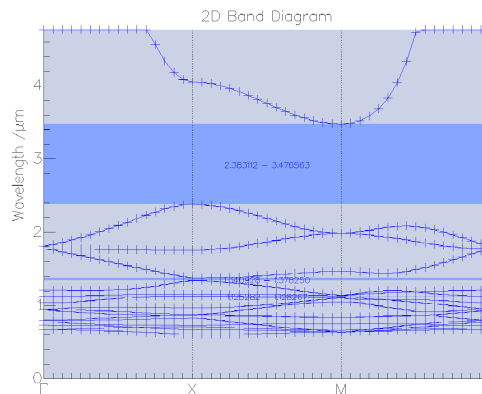
Obr. 3 Periodická fotonická struktura v jedno-, dvou- a třídimensionální konfiguraci [1]

Fotonický krystal, který jsme simulovali v programu PhotonDesign, měl následující vlastnosti: 2D čtvercová mřížka o periodě $1 \mu\text{m}$, dielektrické tyče ve vzduchu o průměru $0,4 \mu\text{m}$ a indexu

lomu 3,4. Dle těchto vlastností jsme určili zakázaný pás pro TM polarizaci v rozsahu 2,38 – 3,48 μm . V krystalu jsme vytvořili defekt – vlnovod, do kterého jsme vpustili světlo o vlnové délce 3 μm . Jelikož byla vlnová délka v rámci zakázaného pásu, světlo se šířilo pouze námi vytvořeným vlnovodem. Na tomto principu fungují i optická vlákna z fotonických krystalů.

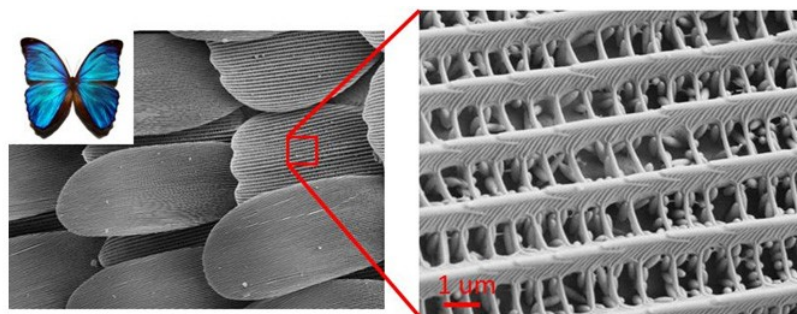


Obr. 3 Okno programu PhotonDesign se simulovaným vlnovodem ve fotonickém krystalu – dělič svazku



Obr. 4 Pásový diagram pro TM polarizaci, zakázaný pás je v rozmezí vlnových délek 2,38 – 3,48 μm (vyznačeno modrým pruhem)

Fotonické krystaly se však mohou vyskytovat i v přírodě, spolu s chemickými barvivy způsobují například barvu křídel některých motýlů a brouků.



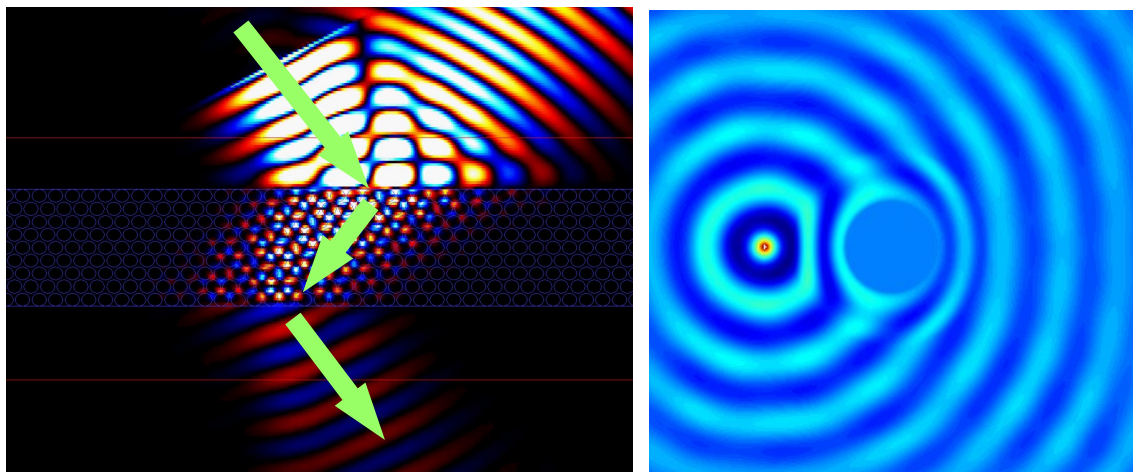
Obr. 5 Struktura křídel motýla druhu *Morpho didius*

4 Metamateriály

Metamateriály mají pro určité vlnové délky zápornou permitivitu a permeabilitu, a tudíž i záporný index lomu. Materiály s takovými vlastnostmi lze vytvořit pouze uměle pomocí strukturování klasických materiálů (rezonátory, fotonické krystaly, multivrstvy), což jim

efektivně dodá požadované vlastnosti permitivity a permeability. V naší simulaci jsme použili fotonický krystal s 2D hexagonální mřížkou vzduchových děr o poloměru $0,29 \mu\text{m}$ a periodě $0,68 \mu\text{m}$ uvnitř dielektrické vrstvy o permitivitě 12. Na vstupu byl použit gaussovský svazek o vlnové délce $2 \mu\text{m}$. Při této simulaci bylo možné pozorovat důsledek záporného indexu lomu metamateriálu, kdy se záření po průchodu šíří od kolmice opačným směrem než po průchodu běžným materiálem (obr. 6 – vlevo).

Díky zvláštním vlastnostem metamateriálů lze použít pro optické maskování (optical cloaking). Vnějšímu pozorovateli se zdá, že mezi ním a zdrojem světla se nenachází žádný objekt. Takto získáváme efekt tzv. „pláště neviditelnosti“. Tento efekt jsme simulovali v programu MATLAB (obr. 6 – vpravo).



Obr. 6 Demonstrace záporného lomu v metamateriálu (vlevo); Simulace optical cloaking (vpravo)

5 Shrnutí

Pomocí simulačních programů se nám úspěšně podařilo simulovat šíření světla ve fotonických krystalech, demonstrovat záporný index lomu na metamateriálech a upozornit na omezenou použitelnost geometrické optiky. Vše proběhlo dle očekávání supervizorů, a tudíž jsme neučinili žádný pokrok ve vědě.

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] JOANNOPOULOS J. D., JOHNSON S.G., WINN J. N., MEADE R. D.: *Photonic crystals: Molding the flow of light, 2nd Edition* Princeton University Press, 2008.
- [2] CAI W., SHALAEV V.: *Optical metamaterials: fundamentals and applications* Springer Science+Business Media, 2010.
- [3] TAFLOWE A., HAGNESS S. C.: *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method* Artech House, New York, 2000.
- [4] RICHTER I.: *Jak se světlo šíří a rezonuje v nanostrukturách – simulace na počítači; úvodní přednáška k miniprojektu Týden vědy na Jaderce*, 2016.