

# Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě  
Univerzity Karlovy v Praze

- posudek vedoucího       posudek oponenta  
 bakalářské práce       diplomové práce

Autor: **Vojtěch Vozda**

Název práce: **Výpočet optické odezvy fotonických struktur metodou FDTD**

Studijní program a obor: **Fyzika / Obecná fyzika**

Rok odevzdání: **2013**

Jméno a tituly oponenta: **Doc. Ing. Ivan Richter, Dr.**

Pracoviště: **ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská**

Kontaktní e-mail: **ivan.richter@jfifi.cvut.cz**

## Odborná úroveň práce:

- vynikající    velmi dobrá    průměrná    podprůměrná    nevyhovující

## Věcné chyby:

- téměř žádné    vzhledem k rozsahu přiměřený počet    méně podstatné četné    závažné

## Výsledky:

- originální    původní i převzaté    netriviální kompilace    citované z literatury    opsané

## Rozsah práce:

- veliký    standardní    dostatečný    nedostatečný

## Grafická, jazyková a formální úroveň:

- vynikající    velmi dobrá    průměrná    podprůměrná    nevyhovující

## Tiskové chyby:

- téměř žádné    vzhledem k rozsahu a tématu přiměřený počet    četné

## Celková úroveň práce:

- vynikající    velmi dobrá    průměrná    podprůměrná    nevyhovující

## Slovní vyjádření, komentáře a připomínky oponenta:

viz dále posudek

## Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:

viz dále posudek

**Práci** doporučuji nedoporučuji

uznat jako bakalářskou.

**Navrhuji hodnocení stupněm:** výborně  velmi dobře  dobře  neprospěl/a

Místo, datum a podpis oponenta: Praha 9/6/2013

**Doc. Ing. Ivan Richter, Dr.**

## Oponentní posudek na bakalářskou práci posluchače Vojtěcha Vozdy na téma *Výpočet optické odezvy fotonických struktur metodou FDTD*

Předložená bakalářská práce pana Vojtěcha Vozdy, vykonaná na Fyzikálním ústavu UK na MFF UK v Praze, je věnována metodě konečných diferencí v časové doméně (FDTD), která je v současnosti jednou z nejpoužívanějších numerických metod pro analýzu rozličných elektromagnetických, fotonických, resp. plazmonických struktur. Hlavní cíl práce přitom spočíval, na základě provedené rešerše, prostudovat FDTD metodu a vytvořit vlastní FDTD algoritmus, vytvořený program otestovat a ověřit jeho funkčnost a spolehlivost, na vybraných jednoduchých strukturách. Konečně, na základě předchozího bylo zřejmě hlavním cílem navrhnout elementární fotonickou strukturu a vyšetřit detailně její odezvu. Jak je z práce zřejmé, za tímto účelem byla zvolena vlnovodná struktura ve fotonickém krystalu, která byla zkoumána za účelem potenciálního využití v biosenzorech, založených na určování (v tomto případě na základě odezvy na změnu indexu lomu) zkoumaných látek, přítomných v nosném prostředí (podobně jako např. v senzorech založených na rezonanci povrchového plazmonu). Jedná se tedy, podle mého názoru, o problematiku úvodní, vhodnou jako úvodní studie pro účely bakalářské práce, přitom zároveň jako perspektivní a v současné době intenzivně zkoumanou, a to i v širším kontextu. Jedná se tedy jednoznačně o téma bakalářské práce velmi aktuální. Práce tak představuje potřebnou úvodní sondu do dané oblasti, v rámci daného pracoviště školitele, na kterou bude možno jistě s výhodou dále navazovat. Samozřejmě, v současné době existuje řada dostupných FDTD programů (a to jak volně dostupných, např. MIT Meep, F2P, tak komerčních nástrojů, od společností jako např. Photon Design, Lumerical, CMS Studio, Optiwave či RSoft, každý samozřejmě se svými výhodami i nevýhodami). Je dále zřejmé, že vytvoření vlastního nástroje, doprovázené plným pochopením jeho fungování, spojeným nejen s možnostmi ladění, ale také další modifikace, je pro účely takového projektu mnohem cennější, než přímá aplikace byť mnohem sofistikovanějšího dostupného nástroje. Jak je z práce patrné, konečnou, i tato ověřovací srovnání (s nástrojem Meep) byla v rámci práce provedena. Tedy lze předpokládat, že bylo také uchazečem zvládnuto jeho praktické použití.

Posuzovaná bakalářská práce je psána stručně, má pouze 37 číslovaných (celkem 41) stran, obsahuje 27 obrázků, odkazů na literaturu je v závěru práce uvedeno 14. Stručnost však v tomto případě není na úkor srozumitelnosti ani korektnosti textu. Práce jako taková je členěna do 4 hlavních, číslovaných kapitol, součástí je též úvodní a závěrečná kapitola, česká a anglická anotace, (užitečný) seznam použitých zkratk (uvedený v samém závěru práce) a již zmíněný přehled použité literatury. Po stručné úvodní kapitole se v 1. kapitole autor věnuje základům metody konečných diferencí v časové doméně (FDTD), představuje algoritmus FDTD, vývojové rovnice pro případ jedné (1D) a dvou (2D) dimenzí, dále zde diskutuje důležitou otázku numerické stability a okrajových podmínek. Zde je třeba ocenit důkladnost matematického popisu, i když se jedná o známé skutečnosti, jsou autorem srozumitelně a zajímavě popisovány; text je navíc doplňován vlastními jednoduchými ukázkami, např. ve spojitosti se stabilitou, resp. nestabilitou numerického řešení. Druhá kapitola, nazvaná Metody výpočtu odezvy od fotonických struktur, se již autor věnuje dalším podstatným detailům v rámci FDTD metody, specificky diskrétní Fourierově transformaci a její aplikaci v rámci FDTD metody, toku energie, zdrojům a specifikům výpočtu transmisních a reflexních charakteristik v metodě. Ve 3. kapitole jsou již obsaženy autorovy vlastní výsledky aplikace jím implementovaného FDTD algoritmu na vybrané jednoduché (testovací) struktury (jsou tak diskutovány: absorpce ve vodivém prostředí, planparalelní, dvojitěrbina, ohnutý a děrovaný vlnovod). Čtvrtá kapitola již obsahuje podstatnou část výsledků bakalářské práce, totiž aplikaci autorem vyvinuté FDTD metody na simulace fotonických krystalů. Uchazeč se zabývá, na základě svých simulací, možnostmi aplikace fotonických krystalů jakožto biosenzorů – zkoumá transmisní spektrum vlnovodného kanálu, vytvořeném v krystalu a jeho citlivost na změnu různých parametrů. Zde je zajímavé, mj. zkoumání vlivu výrobních nepřesností (náhodná variabilita polohy a velikosti děr byla zavedena do FDTD algoritmu pomocí náhodných čísel). Pro senzorovou aplikaci je dále zkoumána změna transmisních charakteristik na změnu indexu lomu materiálu, vyplňujícího díry ve fotonickém krystalu, ukazuje, že při změnách indexu lomu dochází k dobře pozorovatelným (změna indexu lomu o cca 0,6 způsobuje změnu hrany pásu propustnosti o cca 50 nm), tedy dobře použitelné pro možné senzorové aplikace. V závěrečné fázi této kapitoly je uvažováno několik možných modifikací, za účelem získání větších změn v transmisních spektrech; vlnovod (bez děr) ve fotonickém krystalu je modifikován přidáním dalších děr (vytvoří se de facto defekt - rezonanční dutina, resp. vázané dutiny), při vhodné konfiguraci tak může dojít k požadovaným změnám v transmisním spektru. Práce je formálně zakončena stručným závěrem, přehledem použité literatury a seznamem použitých zkratk.

Co se týče formální stránky, práce je vypracována standardním, velmi pěkným způsobem. Je zřejmé, že zdařilá grafická úprava je autorovi vlastní, vše je zpracováno pečlivě, na velice pěkné textové i grafické úrovni. Neznám přesné zvyklosti a požadavky na práce tohoto typu na MFF UK, ale v mnohém předložená práce dobře odpovídá a je zcela srovnatelná s obdobnými pracemi, se kterými jsem se setkal na FJFI ČVUT v Praze.

Na druhou stranu kladně oceňuji stručnost a zároveň přehlednost textu spolu s jeho dobrou srozumitelností. Formální chyby, překlepy či nepřesnosti jsou drobného, nepodstatného charakteru, takže nestojí za obsáhlejší diskuzi, zmíníme zde snad jen nevhodné použití slova *peak*, nesprávné použití, resp. chybějící interpunkce v textu, nesprávné použití přivlastňovacích přídavných jmen, vytvořených z cizích vlastních jmen (tedy ne *Yee algoritmus*), číslování citací začíná v textu od čísla [2], apod. Větší pozornost mohla být věnována i jazyku v anglickém abstraktu práce. Vesměs se ale jedná o drobnosti, dané také jistou nezkušeností adepta v této úvodní fázi jeho vědecké aktivity. Pokud se týká terminologie, nenašel jsem také žádné problematické či nesprávné použití. Dle mého názoru je struktura vlastní práce zvolena vhodně, text je vyváženou kombinací obecných teoretických definic a jejich aplikací, spolu s přehledem vlastních výsledků, tomu odpovídá i standardní členění do kapitol textu.

Pokud se dále jedná o věcnou stránku, je zřejmé, že všechny cíle předložené bakalářské práce, tak jak byly zadány, byly splněny, v některých aspektech možná i překročeny. Z odborného i pedagogického hlediska tak považuji práci za jednoznačně přínosnou a užitečnou pro další působení jak uchazeče, tak i pro školitele, v rámci pracoviště i v širším kontextu. Jsem dále přesvědčen, že se podařilo vytvořit užitečný software, který může být dále nejen aplikován, ale také rozšiřován a modifikován. Uchazeč tak dle mého názoru zvládl danou, poměrně teoreticky náročnou problematiku, v celé šíři tak, že je schopen v dalším případném studiu ji dále rozvíjet.

K předložené bakalářské práci mám následující dotazy, resp. připomínky, k některým z nich by se autor mohl (tak jak dovolí časové možnosti) v rámci obhajoby vyjádřit:

- 1) Na s. 4 je v textu práce zmíněno ideálně elektricky, resp. ideálně magneticky vodivé prostředí (PEC, resp. PMC). Jaké uplatnění mohou tato prostředí v rámci FDTD (a i obecněji v elektromagnetické numerice) nalézt?
- 2) Na téže stránce je také zmíněna možnost použití diferencí vyšších řádů, v rámci FDTD algoritmu, za účelem dosažení větší přesnosti – zároveň je zde zmíněno, že při jejich použití nastávají jisté problémy, O jaké problémy se může jednat?
- 3) Na s. 21 je zmiňována, jako jedno z možných rozšíření, *transformace blízkého pole do vzdáleného pole* (NF-FF). Pochopil jsem správně, že tato metoda nebyla (zatím) přímo do algoritmu zahrnuta. Má autor představu, co by její zahrnutí v jeho případě znamenalo.
- 4) Podobně je v rámci FDTD algoritmů v řadě případů používáno užitečné rozšíření, tzv. metoda *total field / scattered field*. Má autor představu, co tato technika znamená a k čemu může být užitečná?
- 5) Dále by mne zajímalo, jaký je autorův názor na (ve vazbě na jím uvažovanou a simulovanou frekvenčně závislou absorpci v prostředí) možnost / nutnost (u jakých prostředí) zohlednění disperze indexu lomu (respektive permittivity) v FDTD modelu?
- 6) Bylo by možné do budoucna uvažovat, jako jedno z dalších eventuálních možných rozšíření, v případě uchazečova FDTD programu, i efekt kerrovské nelinearity, co by to pro FDTD algoritmus znamenalo?
- 7) Na s. 30 se mi líbilo zohlednění nepřesností ve výrobě struktury v simulaci transmise vlnovodu ve fotonickém krystalu, pomocí náhodné funkce – uplatněné na poloměr i polohu děr. Pokud jsem dobře pochopil, byla tato náhodnost uplatněna současně. Studoval autor i tyto dva efekty odděleně (tedy pouze náhodná změna poloh děr, při stejných velikostech, resp. pouze náhodná změna velikosti děr, při správných polohách). Pokud ano, který z těchto dvou efektů byl citlivější?
- 8) Konečně, zajímalo by mne detailnější srovnání autorem vytvořeného FDTD programu s (v práci komentovaným) Meep softwarem. Měl případně autor možnost srovnání i s jiným FDTD nástrojem?

**Závěrem** lze konstatovat, že předložená bakalářská práce pana Vozdy dle mého názoru splnila zadání ve všech bodech, dosáhla již i několika zajímavých perspektivních výsledků, čímž splnila i veškeré požadavky na tento typ práce kladené příslušnými předpisy. Jelikož předpokládám kladné zodpovězení všech dotazů a připomínek, tuto bakalářskou práci doporučuji jednoznačně k obhajobě. Jako oponent práci hodnotím stupněm **výborně**.

Ivan Richter

V Praze dne 9. června 2013

Doc. Ing. Ivan Richter, Dr.  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
Katedra fyzikální elektroniky  
Břehová 7, 115 19 Praha 1  
E-mail: ivan.richter@jfifi.cvut.cz