

# Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě  
Univerzity Karlovy v Praze

posudek vedoucího  
 bakalářské práce

posudek oponenta  
 diplomové práce

Autor: **Bc. Vojtěch Vořda**

Název práce: **Pokročilé simulace fotonických struktur metodou FDTD**

Studijní program a obor: **Fyzika / Optika a optoelektronika**

Rok odevzdání: **2015**

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 posudek

**Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:**  
viz posudek

**Práci**

- doporučuji  
 nedoporučuji  
uznat jako diplomovou.

**Navrhuji hodnocení stupněm:**

- výborně  velmi dobře  dobře  neprospěl/a

Místo, datum a podpis oponenta: Praha, 29. května 2015

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

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

---

Předložená diplomová práce pana Vojtěcha Vozdy, vykonaná na Fyzikálním ústavu UK v Praze, je věnována teoretickým základům a zejména numerickým simulacím vybraných fotonických struktur na bázi fotonických krystalů (PhC) pomocí metody konečných diferencí v časové doméně (FDTD). Jako hlavní cíl práce jsou v textu explicitně uvedeny komplexní 3D simulace modulovaného vlnovodu (*holey waveguide*) ukazující jejich potenciál v oblasti biosenzoriky. Z textu je však zřejmé, že cíle byly obsáhlejší, vytvořit a otestovat vlastní 3D FDTD algoritmus, otestovat jeho fungování na jednoduchých fyzikálně názorných případech a v případech, kde to lze (1D případ), ho porovnat s metodou přenosových matic (TMM), též pro tyto účely implementovanou z analytických funkčních předpisů. Fotonické krystaly představují dnes celosvětově velmi aktuální a perspektivní oblast výzkumu a vývoje, a to zejména díky svým zajímavým a unikátním vlastnostem, umožňujícím již dnes řadu reálných (právě v senzorice, diagnostice, laserové a vlnovodné technice) a výhledově i nových potenciálních aplikací. Tato diplomová práce se tak bezesporu věnuje velmi aktuální a perspektivní problematice.

Posuzovaná diplomová práce je psána stručně, má celkem 71 stran, obsahuje 49 obrázků, odkazů na literaturu je v závěru práce uvedeno 38. Práce 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), již zmíněný přehled použité literatury a jeden dodatek, představující základ vytvořeného FDTD kódu. Ve stručné úvodní kapitole, představující fotonické krystaly, biosenzoriku a numerické metody, je také uvedena struktura textu práce, ta vlastně konstatuje (trochu nešťastně, cíle práce měly být jasně formulovány a odděleny) hlavní cíl práce, aplikace 3D FDTD na modulovaný vlnovod. Následující 1. kapitola (teoretický úvod) zahrnuje představení základní problematiky FDTD simulací: numerickou integraci, Yeeho 3D algoritmus FDTD metody, FDTD rozšíření (subbuňkové průměrování, okrajové podmínky, diskrétní Fourierovu transformaci pro spektrální simulace, problematiku disperzních prostředí, převod na vzdálené pole, apod.). Z textu není bohužel vždy zřejmé, zda byla příslušná rozšíření také implementována do autorova FDTD algoritmu. Dále je zde pozornost věnována pokročilejším schémátům konečných diferencí a jejich vazbě na numerickou disperzi, problematika je názorně přiblížena na vlastních simulačních příkladech. Dále jsou zde představeny základy TMM metody, spolu s ukázkami jejich aplikace na konečné a nekonečné braggovské zrcadlo a na výpočet pásové struktury fotonického krystalu. Ve druhé kapitole se již autor věnuje ověření vlastního FDTD kódu, od počátečního 1D problému (nehomogenní dielektrický schod), kde je FDTD porovnáno s TMM, přes ukázkou simulace šíření gaussovského svazku, určení vlnovodných módů v planárních vlnovodech, až po ukázkou řešení 3D difrakčního problému na apertuře.

Hlavní výsledky diplomové práce jsou obsaženy v kapitolách 3 a 4. Kapitola 3 se nejprve věnuje simulacím konkrétních struktur založených na fotonických krystalech, hexagonálnímu PhC vlnovodu a struktuře čirpovanému PhC. Pozornost je zde již věnována charakteristikám, potřebným pro posouzení možné aplikovatelnosti takovýchto struktur pro senzorové aplikace, tedy kromě transmisních spekter také citlivosti (na změnu indexu lomu) a tzv. Q faktoru (činitel jakosti rezonátoru). Ačkoliv je u obou struktur ukázán senzorový potenciál, je pro podrobnou studii ve 4. kapitole vybrána jednodušší struktura modulované mřížky s rezonanční dutinou. Ta je systematicky řešena postupně v 1D, 2D a 3D případě, pozornost je věnována rezonančním módům, transmisním spektrům a vlivu parametrů na charakteristiky citlivosti a činitele jakosti. Jsou také diskutovány rozdílnosti pro jednotlivé dimenze, metodika určování Q faktoru, respektive možné vlivy nedokonalosti výrobních technologií (změna polohy, poloměru děr, změna tvaru děr z cylindrických na kónické, atd.). Práce je formálně zakončena stručným závěrem (6. kapitola), dále přehledem použité literatury, seznamem použitých zkratk, a dodatkem – ukázkou základního FDTD kódu.

Co se týče formální stránky, práce je vypracována standardním, pěkným grafickým způsobem. Jako celek si práce zachovává logickou strukturu, text je vhodně doplňován vysvětlujícími obrázky a tabulkami, které jsou pečlivě zpracované. Použitý anglický jazyk je globálně poměrně dobře srozumitelný a čtivý. Bohužel, text práce byl zřejmě dokončován a uzavírán v časovém tlaku, jinak by řadu drobností, zbytečně snižujících úroveň textu, bylo možné opravit. Prezentace práce v anglickém jazyce se tak nevyvarovala kromě překlepů i řady začátečnických chyb, které místy snižují celkovou srozumitelnost a čtivost textu (nesprávné použití sloves ve 3. osobě jednotného čísla i v otázkách, nesprávné záměny *as – like*, časté ignorování použití určitých a neurčitých členů, špatná interpunkce, aj.). Některé anglické termíny nejsou správně zvoleny, některé výrazy v anglickém textu jsou až příliš hovorové, pro takovýto typ textu zcela nevhodné; autorovi zřejmě chyběl pro jejich použití v angličtině patřičný cit (ne vždy si totiž odpovídají použitelnost v češtině a v angličtině). Z formálního hlediska je také občas využito zarámování důležitého tvrzení. Zde platí upozornění, že předložený text diplomové práce nepředstavuje skripta (např. s. 20). U některých převzatých obrázků je sice správně uveden zdroj, bylo by vhodné ho však doplnit příslušným odkazem. Některá tvrzení navíc nejsou příliš šťastně zvolena, resp. mohou být zavádějící, např. „*Thus two-dimensional numerical technique called Finite element method (FEM) was adapted to PhC modelling [8].*“ Je FEM metoda specifická jen

pro 2D případ? Nemohl být vybrán a komentován vhodnější 3D případ, takto by to vypadat, že FEM metoda je pouze 2D metodou. Také některé uvedené odkazy na literaturu jsou neúplné. Všechny tyto prohřešky však neubírají na vědecké kvalitě této práce, hodnocené v dalším odstavci, diplomant se jich jistě v dalším období vyvaruje. Dle mého názoru je struktura vlastní práce zvolena vhodně, text je vyváženou kombinací obecných teoretických definic a jejich aplikací, spolu s přehledem výsledků, tomu odpovídá i standardní členění do kapitol textu.

Pokud se tedy jedná o věcnou stránku, je zřejmé, že všechny cíle předložené diplomové práce byly splněny. Z odborného hlediska tak považují práci za přínosnou a užitečnou, jak pro další případný výzkum uchazeče, tak i v rámci pracoviště i v širším (vzhledem k angličtině i mezinárodním) kontextu. Uchazeč tak dle mého názoru zvládl danou, poměrně komplikovanou a náročnou problematiku, v celé šíři.

K předložené diplomové práci mám následující dotazy resp. připomínky, k některým z nich by se autor mohl (pokud tak již nebude učiněno v rámci vlastní prezentace) v rámci obhajoby vyjádřit:

1. Na s. 4 je zmíněna škálovatelnost řešení pásové struktury a polí ve fotonickém v případě bezdisperzního prostředí. Jak je to tedy v případě prostředí s disperzí, jak se postupuje v takovémto případě?
2. Na následné straně je provedeno úvodní porovnání SPR sensorové platformy s PhC přístupem. Je zde komentováno, že kritické požadavky, resp. charakteristiky SPR přístupů jsou v případě PhC eliminovány. Opravdu je to takto jednoduché? Jaké by bylo autorovo porovnání obou platform, i na základě jeho vlastních simulací?
3. Na s. 12 v části 1.2.1 je zmíněna situace, kdy jsou objekty zájmu mnohem menší než vlnová délka, pak je autorem zmíněna kvazistatická aproximace, bez dalšího upřesnění. Mohl by diplomant podrobněji vysvětlit, o jakou metodiku se jedná a co znamená?
4. Mohl by dále dizertant vysvětlit komisi význam a myšlenku techniky TFSF (*Total-Field/Scattered-Field*), z textu (s. 16) toto nebylo příliš zřejmé. Obdobně, na téže straně, co se vlastně rozumí pod konvolučními ideálně přizpůsobenými vrstvami (*convolutional perfectly matched layer*).
5. Na s. 18 je zmiňována tzv. Courantova-Friedrichsova-Lewyho podmínka stability FDTD algoritmu, co vlastně vyjadřuje. Jaké jsou autorovy praktické zkušenosti s jejím nastavením při konkrétních výpočtech?
6. Je možné říci, jak by se obr. 1.8 změnil pro případ p (TM) polarizace?
7. V závěru textu na s. 27 autor zmiňuje, že dokonce i v některých 3D případech lze řešení disperzní relace nalézt analyticky. Která řešení to jsou? Obdobně, na s. 36 jsou zmíněny přibližné metody pro určování módů 2D vlnovodů, o které metody se jedná?
8. Na s. 45 je v úvodním odstavci zmíněno asymetrické šíření světla, co je pod tímto termínem rozuměno, lze uvést příklad(y)? Jaký je vztah tohoto asymetrického šíření k nereciprokému šíření světla? Prosím o vysvětlení.
9. Bylo provedeno srovnání autorova kódu s některou jinou 3D FDTD metodou (ať již komerčně či volně dostupnou, např. nástroj *Meep*, apod.)? Takovéto srovnání by mohlo potvrdit správnost autorova softwaru.
10. Na několika místech je komentováno, že výsledek, resp. diskrepance ve srovnání může mj. být způsobena malým rozlišením při FDTD algoritmu. Jaký k tomu byl důvod, nebylo možno toto rozlišení pro finální simulace zvýšit? Jaké vlastně jsou paměťové (a časové) nároky autorova FDTD algoritmu, pro jednotlivé dimenze problému?

**Závěrem** lze konstatovat, že předložená diplomová práce pana Vojtěcha Vozdy dle mého názoru splnila zadání ve všech bodech, dosáhla zajímavých výsledků, čímž splnila i veškeré požadavky na tento typ práce kladené příslušnými předpisy. Výtky nejsou závažného charakteru, dotazy a připomínky budou jistě také zodpovězeny. Tuto diplomovou práci doporučuji jednoznačně k obhajobě, jako oponent práci hodnotím vzhledem k vědecké úrovni stupněm **výborně**.

Ivan Richter

V Praze dne 29. května 2015

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