

# Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě  
Univerzity Karlovy

- posudek vedoucího                       posudek oponenta  
 bakalářské práce                       diplomové práce

Autor/ka: Bc. Ondřej Novák  
Název práce: FDTD simulace funčních fotonických struktur  
Studijní program a obor: Fyzika, Optika a optoelektronika  
Rok odevzdání: 2021

Jméno a tituly vedoucího/opponenta: RNDr. Vojtěch Vozda, Ph.D.  
Pracoviště: Oddělení radiační a chemické fyziky, Fyzikální ústav AV ČR  
Kontaktní e-mail: vozda@fzu.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 vedoucího/oponenta:

Předkládaná práce Bc. Ondřeje Nováka se zabývá numerickým modelováním magnetooptické odezvy od fotonických struktur. K tomu je použit nástroj *Lumerical*, který je k tomuto přizpůsoben. Dle předkládaných výsledků si jeho použití autor dobře osvojil a pochopil jeho funkce. V práci jsou podrobně zkoumány dvě struktury. Je to feromagnetický granát (Ce:YIG) a slitina s tvarovou pamětí (CoNiMnGa). Oba tyto materiály jsou uvažovány ve formě fotonických krystalů položených na vhodném substrátu.

V úvodu práce autor zběžně popisuje fotonické krystaly a jejich případnou výrobu z magneticky aktivních materiálů. První kapitola se pak zabývá jednoduchým úvodem do magnetooptiky, odvozením polarizační elipsy a popisem Faradayovy rotace. V kapitole druhé je úvod do numerické metody FDTD, popis, jak lze modelovat frekvenčně závislou materiálovou odezvu a jak to lze přepsat do počítačového algoritmu. Ačkoli autor uvádí, že podrobný popis metody FDTD zde není třeba, jelikož se jím zabýval již ve své bakalářské práci, tak tato část obsahuje pět stran rovnic (str. 12–17) popisujících daný algoritmus, které jsou, až na části průvodního textu, totožné s předchozí prací. Totožné jsou i dva převzaté obrázky na straně 19 včetně jejich popisků. Dle mého názoru by se tato část neměla v práci vyskytovat a stála by za přepracování.

Na konci druhé kapitoly je porovnání výsledků simulace s Yehovým formalismem. Autor uvádí, že hlavní důraz v práci je kladen na pozici spektrálních píků, nikoli na jejich amplitudu, a rozdílné velikosti píků tedy nejsou podstatné. Přitom hlavním sledovaným parametrem v kapitole 4 je právě pokles reflektivity, nikoli pozice jejího spektrálního minima. Může tak nastat otázka, zda-li je zvolen ten pravý přístup vedoucí k optimalizaci designu druhé struktury.

Třetí kapitola se již zabývá první strukturou a to feromagnetickým granátem Ce:YIG v podobě fotonického krystalu. Autor se zde snaží naladit parametry krystalu tak, aby bylo při malé změně indexu lomu média aplikovaného do děr krystalu dosaženo co největší Faradayovy rotace. Základní spektra jsou dokonce porovnána s experimentálním měřením, které je ale bohužel nedostatečně popsáno a tak se zde nedozvíme skoro nic o původu vzorků ani o způsobu měření. Z textu není vůbec zřejmá ani míra autorova přínosu k této části.

Velké rozpaky u mě vyvolaly sety grafů 3.19 – 3.24 zobrazující blízké pole. Tyto zabírají skoro 6 stran a jejich desetiřádkový popis je zde 6x zkopírován. Jedná se o přímé výstupy z programu *Lumerical*, u kterých navíc není dodrženo měřítko os a tak kruhové díry vypadají jako elipsy. Autor na těchto zobrazeních pole jen velmi krátce diskutuje výskyt rezonančního módu zodpovědného za velkou citlivost Faradayovy rotace na indexu lomu. Osobně jsem nenašel žádný rozdíl mezi prvními třemi sety zobrazujícími rezonanci a druhými třemi zobrazujícími pole ve struktuře bez rezonance.

Jedním ze zkoumaných parametrů je zde účinnost (*figure of merit*), u které autor takřka vůbec neuvádí, jak se ke konkrétním číslům dostal. Ta se navíc napříč prací liší: Prvně (str. 39) uvádí prý podezřele vysokou hodnotu 18,5, která se bez dostatečného vysvětlení díky malé transmisi redukuje na 2,3 (str. 41). V závěru téže kapitoly píše, že díky malé transmisi není hodnota 34,5, ale jen 4,6 (str. 46). V závěru práce pak uvádí, že účinnost není v rozsahu 110 až 150, ale pouze 20 (str. 65).

Polární graf 3.25 (opět přímý výstup programu *Lumerical*) není popsán a jeho význam dostatečně diskutován (Jak vznikají difrakce? Jak jsou počítány? Jak byla získána hodnota transmise 0.1%? Co jsou osy  $u_1$  a  $u_2$ ?). Graf 3.27 není v textu zmíněn vůbec.

Čtvrtá kapitola je věnována druhé struktuře, kde autor sleduje reflektivitu slitiny s tvarovou pamětí v závislosti na deformaci, která může být indukována magnetickým polem. Data získaná ze simulací by především v této kapitole bylo vhodné prezentovat jako finální výsledky. Struktura

práce zde však působí spíše jako laboratorní sešit, do kterého si autor zaznamenává veškeré výsledky včetně těch nepodstatných či slepých. Příklady: Na str. 58 autor zmiňuje, že s danou strukturou by se snad dalo něco dělat, ale namísto toho byly upřednostněny jiné projekty. Velmi nevědecky působí podkapitola 4.1.1 zmiňující původ dat k použité spektrální závislosti indexu lomu. Autor uvádí, že nejlepší výsledky vykazuje poslední ze tří designů, citlivost (Fig. 4.9) však spočítal pouze pro první.

Práce neobsahuje téměř žádnou rešerši, u které by se čtenář dozvěděl, jaké výsledky byly k danému tématu již publikovány. Celkem je zde dvacet citací, což je dle mého názoru u diplomové práce spíše méně. Při bližším pohledu zjistíme, že u pěti z nich je to jen odkaz na převzatý obrázek, dvě reference se neodkazují na původní zdroj, jedna je pouze odkaz na vyhledávač *sciencedirect* se zadaným heslem „*Verdet constant*“ ([9]), webová stránka u reference [13], která byla totožně použita i v bakalářské práci (citováno v březnu 2019), již není aktivní. Celkem je zde 12 zdrojů, z toho 6 článků ve vědeckých časopisech, k nimž nemám výhradu. Obrázek 2.1 je očividně převzat z wikipedie, chybí zde však reference. Na straně 52 se v textu objevuje hypertextový odkaz, který má tu nevýhodu, že po vytisknutí práce na něj nelze kliknout a zdroj tak není možné dohledat. Jedná se navíc o vědecká data a na stránce je přímo uvedena doporučená podoba citace.

Práce je psaná v angličtině, která je na dobré úrovni a text je z větší části dobře srozumitelný. Místy však působí tak, že byl rychle napsán a už ani nezkontrolován (např. str. 28, 1. odst.). Gramatické chyby a překlepy jsou v relativně malé míře, čtenáře však může znejistit například překlep hned na titulní straně u studijního oboru. Dále je to například záměna *badge/bunch*, *square/square*, *comparation/comparison*, *on/in picture*, *substrat/substrate*, *then/than*, apod. Autor by se měl zaměřit na větší konzistenci v textu, např. použití či nepoužití interpunkce za rovnicemi, používání tečky v rovnicích značící násobení (od str. 19), spelování „*polarisation*“ či „*polarization*“, psaní jednotek v rovnicích (rov. 3.2, 3.4), použití britské či americké angličtiny (*colo(u)r*, *behavio(u)r*), apod. Faradayova rotace je napříč textem značena  $\psi$  (str. 22),  $\theta$  (str. 32) či  $\phi$  (str. 43). Mnohem větší důraz měl být určitě kladen také na abstrakt práce, kde při prvním čtení není příliš zřejmé, o jakých strukturách je řeč a co jsou stěžejní výsledky.

Grafická stránka práce je spíše podprůměrná. Obrázky by mohly mít lepší rozlišení, popisky os by měly být větší, v rovnicích je u jednotek či funkcí často použit špatný font. Grafy jsou napříč celou prací umístěny na jiných stranách, než kde jsou referovány. Tento posun činí běžně 3 i více stran, což značně ztěžuje orientaci v textu. Parametry a data v grafech nejsou dostatečně popsány (např. Fig 3.1, Fig. 3.2, Fig. 3.25), u struktur není zřejmé, jakým směrem se světlo šíří a jak je vůči struktuře polarizované. Řecká písmena či exponenty nejsou v popiscích os správně generovány, často se v grafech objevují údaje, k nimž není žádná informace. Jednotky u bezrozměrných veličin se neznačí [-], ale, dle konkrétního případu, [a.u.] či [1]. V práci jsou tři grafy, u nichž jsou data fitována lineární funkcí, ani u jednoho však není fit zobrazen. Grafy s mnoha křivkami (zejména 3.9, 3.12, 4.3, 4.15) jsou velmi nepřehledné a čtenář z nich jen stěží získá kloudnou informaci. Kdyby autor přitom použil jinou reprezentaci dat (např. tzv. waterfall plot, postupná změna barvy křivek s parametrem, 2D reprezentace, ...), tak by tyto výsledky mohly být naopak velmi přínosné a zajímavé. Autor napříč celou prací náhodně zaměňuje nanometry, mikrony a elektronvolty a přepočten většinou nechává pouze na čtenáři. Grafická podoba výsledků celkově působí dojmem, že autor grafy získané ze softwaru *Lumerical* vložil do práce tak, jak mu je program dal a už se příliš nezabýval tím, jak by bylo možné získaná data znázornit lépe a přehledněji.

Celkově se rozhodně jedná o zajímavé téma i výsledky. Množství zkopírovaných rovnic v druhé kapitole, šest nejistých soustav grafů na konci třetí kapitoly, nedostatky v citované literatuře, přímé použití výstupu z programu *Lumerical* bez dalších úprav a často nedostatečná diskuze získaných výsledků však kvalitu práce výrazně snižují. Doprovodné výpočty pomocí metody jako Yehův formalismus či RCWA nejsou dostatečně komentovány a jejich přínos k práci se tak těžko hodnotí. Autor nicméně splnil zadání práce a projevil pochopení netriviálního tématu. Proto práci k obhajobě doporučuji, hodnotím však stupněm dobře. Pokud autor během obhajoby uspokojivě odpoví na níže formulované otázky, tak by se hodnotící stupeň mohl zlepšit.

### **Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:**

1. Rozved'te více experimentální část ve třetí kapitole a upřesněte svůj přínos.
2. Na str. 41 je zmíněno, že stočení polarizace o  $180^\circ$  (graf 3.18) je zodpovědné za změny v grafech 3.21 a 3.24. Diskutujte, prosím, co je v tomto případě přesně myšleno stočením polarizace o  $180^\circ$  a o jaké změny v blízkém poli se následně jedná.
3. Jaká je účinnost (*figure of merit*) první struktury a z jakých dat je spočítána?
4. Z výsledků kapitoly 3 vyplývá, že hloubku děr je nutné ladit méně než o 1%, aby bylo dosaženo rezonance. Je toto proveditelné u reálné struktury?
5. Jakou a o kolik větší citlivost lze očekávat u třetího designu (samonosná folie, kap. 4.3) v porovnání s designem prvním (děrovaná vrstva na substrátu, kap. 4.1)?
6. Jak by měl vypadat experiment, aby bylo dosaženo podélné deformace 25  $\mu\text{m}$  tlusté folie z kap. 4.3? Nedojde spíše k deformaci jiné, například k ohybu folie?
7. V bakalářské práci se autor zabýval napsáním vlastního algoritmu pro FDTD a jeho výpočty na grafické kartě. Z jakého důvodu od něj bylo nyní upuštěno a jak složitá by byla simulace magnetooptické odezvy pomocí vlastního programu?

### **Práci**

- doporučuji  
 nedoporučuji  
uznat jako diplomovou.

### **Navrhuji hodnocení stupněm:**

- výborně  velmi dobře  dobře  neprospěl/a

Místo, datum a podpis vedoucího/oponenta:

V Praze, dne 28. 6. 2021

