

Posudek práce

předložené na Matematicko-fyzikální fakultě
Univerzity Karlovy

- posudek vedoucího posudek oponenta
 bakalářské práce diplomové práce

Autor/ka: **Ing. Josef Navrátil**
Název práce: **Rigorous electromagnetic theory of the optical response of periodic nanostructures**
Studijní program a obor: **Matematika, Matematické modelování ve fyzice a technice**
Rok odevzdání: **2018**

Jméno a tituly vedoucího/opponenta: **RNDr. Roman Antoš, Ph.D.**
Pracoviště: **Fyzikální ústav UK**
Kontaktní e-mail: **antos@karlov.mff.cuni.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/opponenta:

Předložená diplomová práce kolegy Ing. Josefa Navrátila se zabývá modelováním optické odezvy planárních periodických nanostruktur (difrakčních mřížek) pomocí dvou zvolených numerických metod a porovnáním jejich numerické efektivity na sinusoidálních reliéfních mřížkách. Zvolené téma, v rámci diplomového studia značně obtížné, je velmi perspektivní a obě použité metody jsou předmětem základního i aplikovaného výzkumu v předních optických laboratořích v zahraničí.

Práce v rozsahu 70 stran, psaná v anglickém jazyce, je členěna do 6 kapitol zahrnujících podrobný úvod (včetně historie studia mřížkové difrakce a popisu experimentální metody — elipsometrie), obecný popis světla v periodickém prostředí a difrakce na mřížkách, podrobný popis obou použitých numerických metod, srovnání jejich numerické efektivity (včetně srovnání s experimentálními daty) a závěr, po němž následuje 30 referencí. Součástí práce je i autorem vytvořený numerický kód obou metod.

První zvolená metoda, nazvaná v práci „rigorous coupled wave analysis“ (RCWA, metoda vázaných vln), jindy též zvaná „fourierovská modální metoda“ (FMM, v práci rovněž několikrát uvedeno) spočívá v řešení Maxwellových rovnic s danými okrajovými podmínkami pomocí lineárněalgebraických metod, přičemž se veškeré komponenty elektromagnetických polí a prostorové rozložení permitivity rozvinou do Fourierových řad, a po vhodných numerických úpravách (horní limity prostorových frekvencí pro konečnou dimenzi problému) se problém řeší pomocí matic (zahrnující problém vlastních čísel a inverze). Metoda má řadu problémů, které ve své implementaci autor vzorně vyřešil. Použil numericky stabilní propagační algoritmus (Airyho řadu, která je ekvivalentní s rozptylovými maticemi), správnou fourierovskou faktorizaci v materiálovém vztahu (nazvanou Lalanne–Morrisova technika (LMT), jejíž citace je v práci bohužel opomenuta), a jako první na reliéfní mřížce aplikoval metodu normálového vektoru (NVM) s efektivní tvarovou anizotropií (kde jsou módy v obou směrech rozdílné).

Druhá zvolená metoda, zvaná Chandezonova (C-metoda), je založena na zcela jiném přístupu, vhodného především pro reliéfní mřížky. Jejím jádrem je transformace souřadnic, kdy v nových souřadnicích je reliéf zredukován na prostou rovinu, přičemž se řeší modifikované Maxwellovy rovnice obsahující reliéfní funkci a její derivace. Metoda je vhodná pro reliéfy, neboť se řeší okrajové podmínky na jediném rozhraní, zatímco v rámci RCWA je reliéf nutno rozdělit na mnoho pravoúhelníkových „podmřížek“ (v práci nazváno „staircase approximation“). Metoda má rovněž řadu problémů; autor použil návod podle reference [27] z roku 1999, přičemž novější vylepšení metody by byly značně nad rámec této diplomové práce.

Srovnání obou metod je provedeno velmi pečlivě s vhodně zvolenými definicemi numerických chyb. Autorovy výsledky spočítané pomocí C-metody jednak velmi dobře korespondují s hodnotami z použitého článku [27], a jednak dokládají vysokou numerickou efektivitu autorem vytvořené implementace RCWA využívající NVM. Shodují se rovněž v prostorovém rozložení pole a výborně korespondují s dodanými experimentálními daty.

Práce je vzhledem k výše napsanému (přes slabší grafickou stránku a nemnohé chyby a překlepy) vynikající prací v oboru difrakce na mřížkách a může sloužit jako manuál v daném oboru. Původní výsledky numerické analýzy jsou navíc vhodné pro publikaci v renomovaném zahraničním časopise. **Autor splnil všechny cíle a podmínky zadání a získal značné znalosti v oboru Fraunhoferovy difrakce a optiky nehomogenních struktur, a podle mého názoru může být práce uznána jako diplomová práce. Práci proto doporučuji k obhajobě a navrhuji pro ni stupeň výborně.**

Případné otázky při obhajobě a náměty do diskuze:

1. Autor by se mohl pokusit vysvětlit, zda je jeho použitá verze C-metody kompatibilní s Rayleighovou hypotézou, a jak by postupoval při zobecnění C-metody na vrstevnaté reliéfy, případně na reliéfy s nespojitými derivacemi (ostrými hranami).
2. V práci je uveden výpočetní čas jen pro C-metodu. Autor by mohl uvést srovnání s časem výpočtu RCWA s obdobnou numerickou přesností.
3. Konečná Fourierova řada nespojitě funkce (zde permitivita nebo normálová složka elektrického pole) podléhá Gibbsovu jevu, který lze určitými metodami (např. sigma-aproximace) potlačit za cenu určitého rozmazání. Jaký je autorův názor na možné využití této techniky?

Práci

doporučuji

nedoporučuji

uznat jako diplomovou/bakalářskou.

Navrhuji hodnocení stupněm:

výborně velmi dobře dobře neprospěl/a

Místo, datum a podpis vedoucího/opponenta:

V Praze dne 4. 6. 2018

Roman Antoš