

# Skirtingų skaitinių optinio atsako modeliavimo metodų tinkamumo pasirinktoms fotoninėms struktūroms tyrimas

## Investigation of the suitability of different numerical simulation methods for determination optical response of the selected photonic structures

Tomas Klinavičius<sup>1</sup>, Tomas Tamulevičius<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Kauno technologijos universitetas, Medžiagų mokslo institutas, K. Baršausko g. 59, LT-51423

<sup>2</sup>Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas, Studentų g. 50, LT-51368 Kaunas  
[tomas.klinavicius@ktu.lt](mailto:tomas.klinavicius@ktu.lt)

Fotonika yra fizikos sritis tirianti šviesą – jos generavimą, detektavimą bei manipuliavimą ja. Manipuliavimas šviesa dažniausiai yra atliekamas naudojant įvairios konstrukcijos bei sudėties fotoninius prietaisus [1]. Jiems formuoti dažniausiai naudojamos įvairios litografijos bei savirankos technologijos. Fotoninio prietaiso optinis atsakas yra nulemiamas jo konstrukcijos bei naudojamų medžiagų savybių. Todėl prieš gaminant prietaisą reikia tinkamai parinkti jį sudarančių elementų geometriją bei naudojamų medžiagų optines konstantas. Bendru atveju prietaiso optinį atsaką galima įvertinti modeliuojant prietaiso sąveiką su elektromagnetine spinduliuote naudojant Maksvelo lygtis [2].

Maksvelo lygtys gali būti sprendžiamos arba analitiškai, arba skaitiškai. Analitinis sprendimo būdas yra sudėtingas ir dėl to tinkamas tik labai paprastiems atvejams, todėl praktikoje dažniausiai naudojami įvairūs tiek pusiau analitiniai, tiek pilnai skaitiniai jų sprendimo metodai. Šie metodai gali būti skirstomi pagal savo savybes – laikiniai (modeliuojamas prietaiso atsaką į išorinį lauką laike) arba dažniniai (modeliuojamas laike suvidurkintas atsakas vienam dažniui), realios erdvės (prietaisas diskretizuojamas realioje erdvėje) arba Furje erdvės (prietaisas aprašomas Furje skleidiniu) [3]. Skirtingi metodai pasižymi skirtingais pranašumais bei trūkumais, tokiais kaip skaičiavimo sparta, kompiuterio atminties poreikis bei gebėjimas modeliuoti realaus dydžio prietaisus skersinėje bei išilginėje kryptyse. Mokslinėje literatūroje fotoninių elementų modeliavimui dažnai naudojami baigtinių skirtumų metodai bei griežtai susietų bangų analizė [2].

Fotoninės struktūros gali būti pagamintos iš įvairių medžiagų – dielektrikų, puslaidininkių bei metalų. Visos šios medžiagos pasižymi savitomis optinėmis savybėmis, aprašomomis lūžio rodiklio dispersija. Lūžio rodiklis yra kompleksinis dydis, kurio menamoji dalis aprašo spinduliuotės sugertį medžiagoje, o realioji dalis aprašo spinduliuotės fazinio greičio vakuume ir toje medžiagoje santykį. Optikoje dielektrikais yra laikomos medžiagos nepasižyminčios šviesos sugertimi, pvz.: lydytas kvarcas, tad jų lūžio rodiklis turi tik realiąją dalį. Puslaidininkiai, ypač legiruoti, turi ir menamąją lūžio dalį, jos dydis priklauso nuo legiravimo. Metalai pasižymi didele menamąja lūžio rodiklio dalimi [4]. Pastaruoju metu itin didelio susidomėjimo sulaukia plazmonų rezonansu pasižymintys metalai Ag, Au, Ca ir kt.

Priklausomai nuo struktūros, fotoniniai prietaisai taip pat gali būti dvimačiai (plokšti) arba trimačiai (tūriniai). Jų struktūra gali būti sudėtinga arba paprasta bet kurioje kryptyje – tiek skersinėje tiek ir išilginėje. Pagal savo atsaką jie gali būti arba rezonansiniai (pasižymintys specifiniais dažniais, kuriems prietaiso pralaidumas arba atspindys nuo jo smarkiai skiriasi nuo kitų dažnių) arba nerezonansiniai [2].

Vienas iš paprasčiausių baigtiniais skirtumais pagrįstų skaitinių metodų diferencialinėms lygtims bei jų sistemoms spręsti yra dažninis baigtinių skirtumų metodas. Šis pilnai skaitinis metodas aprašo modeliuojamą erdvę diskrečiuose erdvės taškuose ir tuomet transformuoja Maksvelo lygtis į algebrinių tiesinių lygčių sistemą, užrašomą matricine lygtimi:

$$Ax = b$$

kur  $A$  – modeliuojamą erdvę aprašanti kvadratinė matrica,  $x$  – ieškomą elektrinį lauką aprašantis vektorius,  $b$  – modeliuojamą erdvę apšviečiančios spinduliuotės vektorius. Išsprendus matricinę lygtį gaunamas elektrinio lauko pasiskirstymas struktūroje [5].

Griežtai susietų bangų analizės metodas yra Furje erdvės pusiau analitinis metodas kuris naudodamas diskrečiąją Furje transformaciją transformuoja Maksvelo lygtis į Furje erdvę ir aproksimuoja modeliuojamą erdvę skersinėse kryptyse Furje skleidiniu, o išilginėje kryptyje Maksvelo lygtys sprendžiamos analitiškai [6].

Šiame darbe buvo palyginti keleto skirtingų konstrukcijų bei iš skirtingų savybių medžiagų suformuotų fotoninių prietaisų, aptartais metodais sumodeliuoti, optiniai atsakai bei palygintas rezultatų tikslumas bei atsižvelgta į modeliavimo spartą.

*Reikšminiai žodžiai: fotonika, skaitiniai metodai, baigtiniai skirtumai, griežtai susietų bangų analizė.*

### Literatūra

- [1] C. Yeh. *Applied Photonics* (Michigan, Academic Press, 2012).
- [2] B. Gallinet, et al., *Laser Photonics Rev.* **9**, 7 (2015).
- [3] M. N. O. Sadiku. *Computational Electromagnetics with MATLAB* 4th edition (Taylor & Francis, Boca Raton, 2019)
- [4] B. E. A. Saleh and M. C. Teich., *Fundamentals of Photonics*, 2nd edition (Wiley, Hoboken, New Jersey, 2007)
- [5] R. C. Rumpf, *Prog. Electromagn. Res. B.* **36** (2012)
- [6] M. G. Moharam, et al., *J. Opt. Soc. Am. A.* **12**, 5 (1995)