

Topics in computational electromagnetics

August 31, 2019

1 Title

Topics in computational electromagnetics / Избранные главы вычислительной электродинамики

2 Lector

PhD Alexey A. Shcherbakov / к.ф.-м.н. Алексей Александрович Щербаков

3 Master program and semester

Nanophotonics and metamaterials / Нанопотоника и метаматериалы

4 Abstract

The course focuses on Computational Electromagnetics numerical methods (volume integral equation in the coordinate and in the reciprocal space) being alternative to the Finite Element and Finite Difference methods, which are widely used in commercial software packages. The methods appear to be superior to the named ones and can provide an additional physical insight into certain classes of problems in nanophotonics. Students will be given theoretical lectures, and will be offered several projects, which include both coding and analysis of physical phenomena.

Курс посвящен некоторым методам вычислительной электродинамики (объемные интегральные уравнения в координатном и сопряженном пространствах), являющимися альтернативами методам конечных элементов и конечных разностей, которые широко используются в коммерческих пакетах. Рассматриваемые методы для определенного класса задач оказываются предпочтительными и позволяют глубже проанализировать физические свойства изучаемых нанопотонных систем. Предполагается, что студенты прослушают теоретические лекции и выполнят ряд проектов, включающих в себя как задачи на программирование, так и на исследований физических явлений.

5 Prerequisites

General physics, quantum mechanics, electrodynamics, numerical analysis, mathematical physics, complex variable function theory / общая физика, квантовая механика, электродинамика, численные методы, математическая физика, теория функций комплексного переменного

6 Lecture topics

#	Topic	Hours
1	Discrete Dipole Approximation (DDA). Coupled dipoles. Projections methods for linear algebraic equation systems. Fast Fourier Transform. Приближение дискретных диполей. Связанные диполи. Проекционные методы. Быстрое преобразование Фурье.	2
2	Scattering matrices. Analytical properties of scattering matrices. 1D, 2D and 3D examples. Scattering matrices of resonant structures. Матрицы рассеяния и их аналитические свойства. Примеры. Резонансные структуры.	
3	Eigenvalues problems. Fourier space methods for analysis of photonic crystals. Задачи на собственные значения. Фурье-методы анализа фотонных кристаллов.	4
4	VIE method in the reciprocal space. Periodic structures – gratings and photonic crystal slabs. Fourier methods. Fourier Modal Method. Analytical solutions for thin grating slices. Метод объемных интегральных уравнений в сопряженном пространстве. Фурье-модальный метод. Аналитические решения для решеток.	4
5	Poles of scattering matrices and resonances. Calculation of zeros and poles. Analysis of resonant behavior of periodic structures. Полюса и резонансы. Вычисление нулей и полюсов. Анализ резонансных свойств периодических структур.	4
6	True Modal Methods (TMM). Rytov solutions. Modal basis. Quasinormal modes. Resonant decomposition. Методы собственных мод в координатном пространстве. Модальный базис. Квазинормальные моды. Резонансное разложение.	4
7	Discussion of projects Обсуждение проектов	2

7 Course projects

Students will be split into groups of 2-3 persons, each group will be given a separate project. Within each project students shall write a code, make computations, and analyze both numerical solutions and physical effects. Codes can be written in any language, usage of third-party libraries should be discussed separately. The projects shall be presented and discussed by whole group in the last class of the course. Students are expected to answer all the subtasks, which will be given in project descriptions, to be ready to give explanations to their codes, and to demonstrate understanding of the methods and effects they use and analyze. Each project will be accompanied with a detailed description. Project topics are:

1. Effective properties of multilayer structures and photonic crystal slabs. Comparison of rigorous numerical and approximate analytical solutions.

2. Resonant dielectric gratings simulated by the FMM. Simulation of the bound states in the continuum. Calculation of resonances.
3. Resonant metallic gratings simulated by the FMM. Simulation of the enhanced transmission effect.
4. Scattering properties of nanoparticles. Benchmarking of the DDA versus the Mie theory. Applicability of the dipole approximation.
5. Band structures of 2D photonic crystals. KKR versus plane wave decomposition methods.
6. TMM for 1D photonic crystal slab. Pole and zero trajectories in complex plane. Perfect absorbers.

Для выполнения проектов студенты будут разбиты на малые группы по 2-3 человека, и каждая группа будет выполнять свой проект. В рамках каждого проекта студенты должны написать код, выполнить с его помощью вычисления, и провести анализ как численных решений, так и предлагаемых физических явлений. Код может быть написан на любом языке, использование сторонних библиотек должно обсуждаться отдельно. На последнем занятии каждая группа должна представить презентацию по своему проекту для обсуждения всей группой. Студенты должны будут ответить на вопросы, которые будут даны в описании проектов, должны быть готовы пояснить свой код, а также продемонстрировать понимание используемых методов. Темы проектов:

1. Эффективные свойства многослойных структур и срезов одномерных фотонных кристаллов. Сравнение строгих решений с приближенными.
2. Моделирование резонансных диэлектрических решеток с помощью Фурье-модального метода. Связанные состояния в континууме.
3. Моделирование резонансных металлических решеток с помощью Фурье-модального метода. Эффект усиленного пропускания.
4. Рассеяние на наночастицах. Сравнение DDA и теории Ми. Применимость дипольного приближения. Спектры.
5. Зонная структура двумерных фотонных кристаллов.
6. Метод истинных мод. Траектории полюсов и нулей. Идеальный поглотитель.

8 Grading policy

- 70% course projects
- 30% final exam (theoretical questions)

Course projects: student can describe a code (20%), students answered the questions on their project (30%), students prepared and made a presentation (20%)

- 70% проекты
- 30% экзамен (теоретические вопросы)

Оценка по проектам складывается из: студент может дать детальные пояснения к коду (20%), студенты ответили на вопросы по своему проекту (30%), студенты подготовили и сделали презентацию (20%)

9 Grading

- > 90 – “excellent”
- > 70 – “good”
- > 50 – “satisfactory”
- ≤ 50 – “unsatisfactory”

References

- [1] Y. Saad, *Iterative methods for sparse linear systems*. SIAM, 2003.
- [2] M. A. Yurkin and M. I. Mishchenko, “Volume integral equation for electromagnetic scattering: rigorous derivation and analysis for a set of multilayered particles with piecewise-smooth boundaries in a passive host medium,” *Phys. Rev. A*, vol. 97, p. 043824, 2018.
- [3] M. A. Yurkin and A. G. Hoekstra, “The discrete dipole approximation: An overview and recent developments,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 106, pp. 558–589, 2007.
- [4] A. A. Shcherbakov, Y. V. Stebunov, D. F. Baidin, T. Kämpfe, and Y. Jourlin, “Direct s-matrix calculation for diffractive structures and metasurfaces,” *Phys. Rev. E*, vol. 97, pp. 063301–10, 2018.
- [5] B. Gralak, “Analytic properties of the electromagnetic Green’s function,” *J. Math. Phys.*, vol. 58, p. 071501, 2017.
- [6] M. A. Yurkin and A. G. Hoekstra, “The discrete-dipole-approximation code ADDA: capabilities and known limitations,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 112, pp. 2234–2247, 2011.
- [7] N. P. K. Cotter, T. W. Preist, and J. R. Sambles, “Scattering-matrix approach to multilayer diffraction,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 12, pp. 1097–1103, 1995.
- [8] L. Li, “Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, pp. 1024–1035, 1996.
- [9] N. A. Gippius, T. Weiss, S. G. Tikhodeev, and H. Giessen, “Resonant mode coupling of optical resonances in stacked nanostructures,” *Opt. Expr.*, vol. 18, pp. 7569–7574, 2010.
- [10] E. Popov, ed., *Gratings: Theory and Numeric Applications*. Institute Fresnel, AMU, 2012.
- [11] G. Granet and B. Guizal, “Efficient implementation of the coupled-wave method for metallic lamellar gratings in TM polarization,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, pp. 1019–1023, 1996.
- [12] L. Li, “Use of fourier series in the analysis of discontinuous periodic structures,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, pp. 1870–1876, 1996.
- [13] D. Y. K. Ko and J. C. Inkson, “Matrix method for tunneling in heterostructures: Resonant tunneling in multilayer systems,” *Phys. Rev. B*, vol. 38, pp. 9945–9951, 1988.
- [14] D. A. Bykov and L. L. Doskolovich, “Numerical methods for calculating poles of the scattering matrix with applications in grating theory,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 31, pp. 793–801, 2013.
- [15] N. A. Gippius and S. G. Tikhodeev, “The scattering matrix and optical properties of metamaterials,” *Phys. Usp.*, vol. 52, pp. 967–971, 2009.
- [16] I. C. Botten and M. S. Craig, “The dielectric lamellar diffraction grating,” *Opt. Acta*, vol. 28, pp. 413–428, 1981.