

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ

Кафедра квантовой электроники

# ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК МИ-РЕЗОНАНСНЫХ НАНОЧАСТИЦ, СВЯЗАННЫХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВОЛНОВОДАМИ

Зав. кафедрой  
квантовой электроники:  
д. ф. -м. н., профессор  
Панов В. И.

Бакалаврская работа  
студента 427 группы

Нестерова К. Е.  
Научный руководитель:  
к. ф. -м. н., н. с.  
Щербаков М. Р.

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Литературный обзор</b>	<b>4</b>
2.1	Метаматериалы . . . . .	4
2.2	Рассеяние Ми . . . . .	4
2.3	Оптический магнетизм . . . . .	4
2.4	Метод конечных разностей во временной области . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Постановка задачи</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Оригинальная часть</b>	<b>7</b>
4.1	Исследуемые наноструктуры . . . . .	7
4.2	Численный расчёт для одиночного нанодиска . . . . .	7
4.3	Численный расчёт для массива нанодисков . . . . .	7
4.4	Обсуждение . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Заключение</b>	<b>9</b>
	<b>Список литературы</b>	<b>10</b>

# 1 Введение

С каждым годом развитие технологических возможностей человечества позволяет производить искусственные структуры с характерными размерами всё меньших порядков. В настоящее время реальностью является управление формой и размерами материалов на наномасштабах, что позволяет создавать композитные материалы с заданными свойствами. Это обуславливает необходимость исследования параметров и области применения подобных метаматериалов. Особо интересным классом метаматериалов являются структуры с оптическим магнетизмом, то есть обладающие резонансом с ненулевым магнитным дипольным моментом на оптических частотах, что невозможно в обычных веществах, встречающихся в природе в естественном виде. Известна возможность возбуждения магнитного дипольного резонанса как для металлических метаматериалов, так и для чисто диэлектрических наноструктур.

При кажущейся простоте металлических решений они обладают существенным недостатком в виде больших омических потерь. Исследование нелинейно-оптических свойств требует высокой интенсивности излучения, порой достигающей порога оптической прочности материалов, что делает подобные решения неприменимыми. Неметаллические наноструктуры выгодно выделяются отсутствием подобного недостатка, однако пока что слабо изучены.

В данной дипломной работе численно определены оптимальные параметры для возбуждения магнитного резонанса в одиночном кремниевом нанодиске, связанном с диэлектрическим волноводом, и оптимизирована конфигурация системы из 20 нанодисков для потенциального создания оптического переключателя (?).

## 2 Литературный обзор

### 2.1 Метаматериалы

Метаматериалы являются искусственно созданными материалами с заданными свойствами. Взаимодействие метаматериалов с электромагнитными или звуковыми [23] волнами в первую очередь определяется формой и размерами отдельных и, как правило периодических, элементов, нежели свойствами веществ, из которых они изготовлены.

TODO: отрицательный показатель преломления

TODO: Веселаго [24] и Пендри + Смит [15]

### 2.2 Рассеяние Ми

TODO: теория Ми [2, 8, 9, 12]

TODO: Массив дисков [6]

TODO: возможность чистого диэлектрика [10, 16]

### 2.3 Оптический магнетизм

TODO: немного теории [18]

TODO: металлические [7, 13, 17]

TODO: сравнение металлических и кремниевых нанодисков [11] + чисто кремниевые [3, 20] + кремниевые цилиндры [14]

TODO: аналогичные по функционалу структуры [1, 4, 5, 19, 21]

## 2.4 Метод конечных разностей во временной области

TODO: теория метода [22] + Lumerical. Картинка рабочей области?

### 3 Постановка задачи

TODO: идея (исследованы нанодиски, исследована связь с резонансами высших мод, надо посмотреть что будет на связи с минимально возможной модой)

TODO: пункты исследования (оптимизация одиночного, оптимизация массива в различных конфигурациях (зеркальный) )

## 4 Оригинальная часть

### 4.1 Исследуемые наноструктуры

TODO: сэндвичи, характерные размеры

TODO: картинки одиночного в 4 проекциях

### 4.2 Численный расчёт для одиночного нанодиска

TODO: первая высота

TODO: графики, распределение полей (? возможно стоит пересчитать пару конфигураций)

TODO: вывод что надо меняться, вторая высота

TODO: графики, сперва меняли радиус для нулевого расстояния

TODO: нашли оптимальный радиус

TODO: графики, меняли расстояние, оптимально на слегка вдвинутом

TODO: графики распределения полей внутри нанодиска

TODO: вывод, что нужный резонанс

### 4.3 Численный расчёт для массива нанодисков

TODO: что пытаемся оптимизировать (максимум производной)

TODO: графики для дисков с одной стороны

TODO: идея, что можно добавить дисков снизу

TODO: графики для дисков снизу (сперва зеркально, затем посередине + оптимизированные 4-5 дисков)

TODO: вывод: провал растёт медленно, максимальная производная меньше и резонанс расплывается = не ок

TODO: по-хорошему довести до такого же количества дисков, но с одной стороны и сравнить. В любом случае графики

TODO: графики и вывод для самой эффективной структуры

## 4.4 Обсуждение

TODO: до конца не успеваем досчитать, предположить экстраполяцию

TODO: возможный фундаментальный предел глубины (пока неясно, считается, вроде растёт линейно) и максимума производной (а вот и нет, производная растёт как степень/экспонента(?). ширины провала(очень хорошо описывается убывающей экспонентой))

TODO: графики производных параметров от количества дисков (глубина, ширина, максимальная производная)

TODO: ввести метрику и сравнить с аналогичными функционально структурами



## 5 Заключение

TODO: посчитали, оптимизировали, сравнили с аналогичными. Пересказ постановки задачи + обсуждения, только всё получилось

## Список литературы

- [1] All-optical control of light on a silicon chip / R. Almeida Vilson, A. Barrios Carlos, R. Panepucci Roberto, Michal Lipson // *Letters to Nature*. — 2004. — Vol. 431, no. October. — P. 1081–1084.
- [2] Bohren Craig F., Huffman Donald R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* / Ed. by Craig F. Bohren, Donald R. Huffman. — Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998. — apr. — ISBN: 9783527618156.
- [3] Demonstration of magnetic dipole resonances of dielectric nanospheres in the visible region / Andrey B. Evlyukhin, Sergey M. Novikov, Urs Zywietz et al. // *Nano Letters*. — 2012. — Vol. 12, no. 7. — P. 3749–3755.
- [4] Gondarenko Alexander, Levy Jacob S., Lipson Michal. High confinement micron-scale silicon nitride high Q ring resonator. // *Optics Express*. — 2009. — Vol. 17, no. 14. — P. 11366–70.
- [5] Kippenberg T. J., Spillane S. M., Vahala K. J. Kerr-nonlinearity optical parametric oscillation in an ultrahigh-Q toroid microcavity // *Physical Review Letters*. — 2004. — Vol. 93, no. 8. — P. 18–21.
- [6] Lewin L. The electrical constants of a material loaded with spherical particles // *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*. — 1947. — jan. — Vol. 94, no. 27. — P. 65–68.
- [7] Magnetic metamaterials at telecommunication and visible frequencies / C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden et al. // *Physical Review Letters*. — 2005. — Vol. 95, no. 20. — 0504774.
- [8] Mie Gustav. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // *Annalen der Physik*. — 1908. — Vol. 330, no. 3. — P. 377–445.
- [9] Mie Gustav. Contributions to the optics of turbid media, particularly of colloidal metal solutions // *Ann. Phys.* — 1908. — Vol. 25, no. 3. — P. 377–445.
- [10] Mie resonance-based dielectric metamaterials / Qian Zhao, Ji Zhou, Fuli Zhang, Didier Lippens // *Materials Today*. — 2009. — Vol. 12, no. 12. — P. 60–69.
- [11] Miroshnichenko Andrey E., Kivshar Yuri S. Fano Resonances in All-Dielectric Oligomers // *Nano Letters*. — 2012. — dec. — Vol. 12, no. 12. — P. 6459–6463.

- [12] Modeling of isotropic backward-wave materials composed of resonant spheres / L. Jylhä, I. Kolmakov, S. Maslovski, S. Tretyakov // Journal of Applied Physics. — 2006. — Vol. 99, no. 4. — P. 043102. — 0507324.
- [13] Optical properties of spherical gold mesoparticles / Andrey B. Evlyukhin, A. I. Kuznetsov, S. M. Novikov et al. // Applied Physics B: Lasers and Optics. — 2012. — Vol. 106, no. 4. — P. 841–848.
- [14] Optical spectroscopy of single Si nanocylinders with magnetic and electric resonances. / Andrey B. Evlyukhin, René L. Eriksen, Wei Cheng et al. // Scientific Reports. — 2014. — Vol. 4. — P. 4126.
- [15] Pendry J. B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // Physical Review Letters. — 2000. — oct. — Vol. 85, no. 18. — P. 3966–3969.
- [16] Realizing optical magnetism from dielectric metamaterials / James C. Ginn, Igal Brener, David W. Peters et al. // Physical Review Letters. — 2012. — Vol. 108, no. 9. — P. 1–5.
- [17] Second-harmonic generation from magnetic metamaterials. / Matthias W Klein, Christian Enkrich, Martin Wegener, Stefan Linden // Science (New York, N.Y.). — 2006. — Vol. 313, no. 5786. — P. 502–504.
- [18] Shalaev Vladimir M. Optical negative-index metamaterials // Nature Photonics. — 2007. — jan. — Vol. 1, no. 1. — P. 41–48.
- [19] Soltani Mohammad, Yegnanarayanan Siva, Adibi Ali. Ultra-high Q planar silicon microdisk resonators for chip-scale silicon photonics. // Optics express. — 2007. — Vol. 15, no. 8. — P. 4694–4704.
- [20] Tailoring directional scattering through magnetic and electric resonances in subwavelength silicon nanodisks / Isabelle Staude, Andrey E. Miroshnichenko, Manuel Decker et al. // ACS Nano. — 2013. — Vol. 7, no. 9. — P. 7824–7832.
- [21] Ultrahigh-Q Tunable Whispering-Gallery-Mode Microresonator / M. Pöllinger, D. O’Shea, F. Warken, A. Rauschenbeutel // Physical Review Letters. — 2009. — Vol. 103, no. 5. — P. 1–4. — 0901.4921.
- [22] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media. — 1966.
- [23] Zhang Shu, Yin Leilei, Fang Nicholas. Focusing Ultrasound with an Acoustic Metamaterial Network // Physical Review Letters. — 2009. — may. — Vol. 102, no. 19. — P. 194301.
- [24] Веселаго В. Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // Успехи физических наук. — 1967. — Т. 6, № 9. — С. 2861.