



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ АКАДЕМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

194021, С.-Петербург, ул. Хлопина, 8, корп. 3, лит. А  
Телефон (факс): (812) 448-69-80  
www.spbau.ru  
ОКПО 59503334, ОГРН 1027802511879  
ИНН/КПП 7804161723/780401001



УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по науке  
СПбАУ РАН,  
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

Жуков А.Е.  
М.П.

«16» июля 2019 г

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Санкт-Петербургского национального  
исследовательского Академического университета Российской академии  
наук»**

о

диссертационной работе Щербак Сергея Александровича  
«Электродинамическое моделирование резонансных оптических структур»,  
представляемой на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного  
состояния»

Диссертация **«Электродинамическое моделирование резонансных оптических структур»** выполнена на базе кафедры физики и технологии наногетероструктур Академического университета. В 2013 г. Щербак Сергей Александрович окончил с отличием бакалавриат Физико-технического факультета Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого по специальности «Физика», в 2015 году – с отличием магистратуру Академического университета по специальности «Электроника и нанoeлектроника» и в том же году поступил в аспирантуру СПбАУ. В период подготовки диссертации соискатель Щербак Сергей Александрович работал в научно-образовательном центре «Физики и технологии гетерогенных материалов и наногетероструктур» (НОЦ ФТГМН) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в должности младшего научного сотрудника. Научный руководитель соискателя – доктор физико-математических наук, профессор, и. о. заведующего кафедрой физики и

технологии наногетероструктур Академического университета **Липовский Андрей Александрович**.

По итогам обсуждения диссертации «**Электродинамическое моделирование резонансных оптических структур**» принято следующее заключение:

**1. Оценка выполненной соискателем работы.** По теме доклада Щербака С.А. было задано 8 вопросов, на которые были получены исчерпывающие, аргументированные ответы. В обсуждении диссертационной работы Щербака С.А. приняли участие: д.ф.-м.н., чл.-корр. Жуков А.Е., д.ф.-м.н., профессор Липовский А.А., д.ф.-м.н., Максимов М.В., д.ф.-м.н. Крыжановская Н.В., д.ф.-м.н., профессор Журихина В.В..

Кафедра физики и технологии наногетероструктур отмечает, что в результате выполненных соискателем исследований:

- Разработаны модели, описывающие электродинамические свойства резонансных оптических структур, а частности, полуаналитическая модель поляризуемости металлических nanoостровков усечённой сферической формы на подложке, покрытых слоем диэлектрика конечной толщины, аналитическая модель генерации второй оптической гармоники наночастицами с металлическим ядром и диэлектрической оболочкой, а также численная модель микрорезонаторов с модами шепчущей галереи.
- В работе впервые продемонстрирован новый эффект: интенсивность генерации второй оптической гармоники золотой nanoостровковой плёнкой с диэлектрическим покрытием монотонно растёт с увеличением толщины покрытия вне зависимости от положения плазмонного резонанса частицы относительно длины волны второй гармоники падающего излучения.
- Впервые показано, что моды в кольцевых резонаторах с прямыми вставками не являются высокосимметричными модами шепчущей галереи, как в классических дисковых и кольцевых микрорезонаторах. Также теоретически исследовано влияние диэлектрических покрытий на микродисковые резонаторы и эффективность взаимодействия различных мод шепчущей галереи микродиска с резонансной диэлектрической антенной, лежащей на его поверхности.

Во всех выступлениях была дана положительная оценка диссертационной работы, отмечены актуальность темы проведенного исследования и практическая значимость полученных результатов. Выступлений с отрицательной оценкой не было.

**2. Актуальность диссертационной работы.** Резонансные оптические структуры находят применение практически во всех областях современной оптики и фотоники. Свойства таких структур, как металлических с

плазмонными резонансами, так и диэлектрических с пространственными, во многом определяются каждой конкретной конфигурацией, что открывает широкое поле для исследований. В частности, мало изучено влияние диэлектрических покрытий и оболочек на свойства как плазмонных наночастиц, так и микрорезонаторов с модами шепчущей галереи. Также модовые свойства микрокольцевых резонаторов с прямыми вставками ранее оставались практически без внимания. Все эти вопросы детально освещаются в диссертационном исследовании Щербака С.А., что и обуславливает его актуальность.

**3. Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.** Личный вклад автора заключается в разработке теоретических моделей, описывающих резонансные характеристики плазмонных наноструктур и микрорезонаторов с модами шепчущей галереи, в том числе структур с диэлектрическими покрытиями, а также связь микрорезонаторов с диэлектрической наноантенной. Все математические выкладки и численные расчёты, представленные в диссертации, были проведены непосредственно автором. Анализ экспериментальных данных, использованных для верификации теоретических результатов, преимущественно выполнен автором диссертации.

**4. Степень достоверности результатов проведенных исследований.** Достоверность изложенных в диссертации теоретических моделей подтверждается их хорошим согласованием с экспериментальными данными, а предельные случаи построенных моделей совпадают с известными литературными данными.

**5. Научная новизна работы состоит в следующем:**

1. Впервые построена модель, описывающая плазмонные свойства имеющих форму усечённой сферы и покрытых диэлектрическим слоем конечной толщины металлических nanoостровков на подложке.
2. Продемонстрирован и теоретически описан новый эффект – возрастание сигнала второй гармоники от nanoостровковой плёнки золота при увеличении толщины покрывающего диэлектрического слоя вне зависимости от положения плазмонного резонанса частицы относительно длины волны второй гармоники падающего излучения.
3. Впервые проанализированы особенности распределений электромагнитных полей собственных мод оптических микрорезонаторов формы кольца с двумя прямыми вставками. Теоретически исследована связь мод шепчущей галереи в микродисковых резонаторах с диэлектрическими резонансными наноантеннами. Впервые показана возможность модовой селекции по

поляризации при использовании таких наноантенн: ТЕ моды взаимодействуют исключительно с электрическими резонансами наноантенны, ТМ – с магнитными.

4. Разработана новая аналитическая модель, описывающая генерацию второй оптической гармоники (ГВГ) сферической наночастицей с металлическим ядром и диэлектрической оболочкой. Впервые показано, что за счёт сочетания плазмонного резонанса ядра с пространственным резонансом оболочки эффективность ГВГ может увеличиваться на несколько порядков по сравнению с непокрытыми металлическими частицами, и представлено физическое объяснение этого эффекта.

#### **6. Значимость полученных результатов для теории и практики:**

Построенная теоретическая модель плазмонных свойств металлических наночастиц усечённой сферической формы, покрытых диэлектриком, предлагает подход к оптимизации металлических наноостровковых плёнок с покрытием для увеличения чувствительности биосенсоров и повышения сигнала в рамановской спектроскопии. Продемонстрированное и объяснённое в диссертационной работе увеличение эффективности ГВГ в десятки раз за счёт нанесения диэлектрической оболочки на металлические наночастицы вне зависимости от соотношения длины волны возбуждения и длины волны плазмонного резонанса частиц существенно для нелинейной наноплазмоники. В частности, это относится к нелинейной спектроскопии, поскольку, позволяет отказаться от использования перестраиваемых лазеров. Описание структуры оптических мод резонаторов формы кольца с прямыми вставками, а также анализ особенностей селективного вывода излучения из микродисковых лазеров через резонансную диэлектрическую наноантенну обеспечивают возможность разработки микрооптических систем, содержащих такие структуры, для внутричиповой оптической коммуникации. Разработанная аналитическая модель ГВГ сферическими наночастицами с диэлектрическим ядром и металлической оболочкой, показывающая, что сочетание плазмонного резонанса ядра с пространственным резонансом в оболочке усиливает сигнал второй гармоники на несколько порядков, позволяет предложить такие бirezонансные структуры для многократного увеличения эффективности сенсоров на основе нелинейного рассеяния.

**7. Внедрение результатов работы.** Результаты данного диссертационного исследования использовались при выполнении следующих проектов и грантов:

1) Госзадание в сфере научной деятельности от Министерства образования и науки РФ (в настоящее время Министерство науки и высшего образования

РФ) “Высококочувствительные биосенсоры на основе самоорганизованных металлических наночастиц”, № 3.2869.2017/ПЧ

- 2) Грант РФФИ “Микродисковые лазеры с инъекционной накачкой для интегральной оптоэлектроники” 16-29-03111
- 3) Госзадание в сфере научной деятельности от Министерства образования и науки РФ (в настоящее время Министерство науки и высшего образования РФ) “Металлические наночастицы на поверхности стёкол: технология самоорганизации, свойства, приложения”, № 16.1233.2014/К
- 4) Молодёжный грант РФФИ “Разработка и исследование бирезонансных плазмонных структур для биосенсинга”, № 18-32-00097

**8. Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- 1) 1<sup>st</sup> International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2014", Санкт-Петербург, СПбАУ, 25-27 марта 2014.
- 2) 2<sup>nd</sup> International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2015", Санкт-Петербург, СПбАУ, 7 апреля 2015.
- 3) International Youth Conference "PhysicA.SPb/2015", Санкт-Петербург, ФТИ им. Иоффе, 27-29 октября 2015.
- 4) 3<sup>rd</sup> International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2016", Санкт-Петербург, СПбАУ, 28-30 марта 2016.
- 5) XII Международная конференция "Прикладная оптика – 2016", Санкт-Петербург, ГОИ им. Вавилова, 14-18 ноября 2016.
- 6) 4<sup>th</sup> International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2017", Санкт-Петербург, СПбАУ, 3-6 апреля 2017.
- 7) 13th International Young Scientist Conference Developments in Optics and Communications, Riga, Latvia, 6-7 April 2017.
- 8) 14th International Conference on Nanosciences and Nanotechnologies (NN17), Thessaloniki, Greece, 4-7 July 2017.
- 9) III Всероссийский научный форум "Наука будущего – наука молодых 2017", Нижний Новгород, 12-15 сентября 2017.
- 10) 25<sup>th</sup> International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology 2017", Санкт-Петербург, СПбАУ, 26-30 июня 2017.
- 11) 5<sup>th</sup> International School and Conference "Saint-Petersburg OPEN 2018", Санкт-Петербург, СПбАУ, 2-5 апреля 2018.
- 12) Conference on Lasers and Electro-Optics “CLEO: Applications and Technology 2018” San Jose, California United States, 13–18 May 2018
- 13) Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2018), Toyama, Japan, 1-4 August 2018.

**9. Публикации.**

Материалы диссертационного исследования Щербака С.А. опубликованы в **14** работах в высокоуровневых англоязычных изданиях, индексируемых в базах Scopus/WoS и входящих в перечень ВАК:

1. Kryzhanovskaya N.V. 3.5- $\mu\text{m}$  Radius Race-Track Microlasers Operating At Room Temperature With 1.3- $\mu\text{m}$  Quantum Dot Active Region / N. V. Kryzhanovskaya, Yu. S. Polubavkina, **S. A. Scherbak**, E. I. Moiseev, V. V. Zhurikhina, F. I. Zubov, A. A. Lipovskii, M. M. Kulagina, S. I. Troshkov, Yu. M. Zadiranov, M. V. Maximov, A. E. Zhukov // Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 121. – № 4. – P. 1-7.
2. Scherbak S.A. Tuning Plasmonic Properties of Truncated Gold Nanospheres by Coating / **S. Scherbak**, N. Kapralov, I. Reduto, O. Svirko, A. Lipovskii // Plasmonics. – 2017. – Vol. 12. . – 6. – P. 1903-1910.
3. Scherbak S.A. Electric Properties of Hemispherical Metal Nanoparticles: Influence of the Dielectric Cover and Substrate / **S. A. Scherbak**, O. V. Shustova, V. V. Zhurikhina, A. A. Lipovskii // Plasmonics. – 2015. – Vol. 10. – № 3. – P. 519-527.
4. Scherbak S.A. Plasmonic properties of metal nanoislands: Practical guide / **S.A. Scherbak**, A.A. Lipovskii // Journal of Applied Physics. – 2016. –Vol. – 119. – № 16.
5. Chervinskii S. Nonresonant Local Fields Enhance Second-Harmonic Generation from Metal Nanoislands with Dielectric Cover / S. Chervinskii, K. Koskinen, **S. Scherbak**, M. Kauranen, A. Lipovskii // Physical Review Letters. – 2018. – Vol. 120. – № 11. – P. 113902.
6. Heisler F. Resonant Optical Properties of Single Out-Diffused Silver Nanoislands / F. Heisler, E. Babich, **S. Scherbak**, S. Chervinskii, M. Hasan, A. Samusev, A. Lipovskii // The Journal of Physical Chemistry C. – 2015. – Vol. 119. – № 47. – P. 26692-26697.
7. Babich E.S. Raman enhancement by individual silver hemispheroids / E. Babich, A. Redkov, I. Reduto, **S. Scherbak**, A. Kamenskii, A. Lipovskii // Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 397. – P. 119-124.
8. Scherbak S.A. Electric properties of hemispherical metal nanoparticles: Influence of the dielectric substrate / **S. A. Scherbak**, O. V. Shustova, V. V. Zhurikhina, A. A. Lipovskii // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Vol. 541. – № 1.
9. Babich E. S. Resonant properties of coupled silver hemispheroids / E. S. Babich, **S. A. Scherbak**, A. V. Redkov, A. N. Kamenskii, I. V. Reduto, A. A. Lipovskii // Journal of Nanophotonics. – 2017. – Vol. 11 – №1 – P. 032503.
10. Raskhodchikov A. V. Numerical simulation of eigenmodes of ring and race-track optical microresonators / A. V. Raskhodchikov, D. V. Raskhodchikov, **S. A. Scherbak**, A. A. Lipovskii // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – № 6.

11. Polubavkina Yu. S. Investigation of whispering gallery modes in microlasers by scanning near-field optical microscopy / Yu. S. Polubavkina, N. V. Kryzhanovskaya, A. M. Nadtochiy, A. M. Mintairov, A. A. Lipovsky, **S. A. Scherbak**, M. M. Kulagina, M. V. Maximov, A. E. Zhukov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 917. – № 5.
12. Raskhodchikov A. V. Dielectric surrounding decimates eigenmodes of microdisk optical resonators / A. V. Raskhodchikov, S. A. Scherbak, N. V. Kryzhanovskaya, A. E. Zhukov, A. A. Lipovskii // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1124. – № 5. – P. 051031.
13. Kryzhanovskaya N. Enhanced light outcoupling in microdisk lasers via Si spherical nanoantennas / N. Kryzhanovskaya, Yu. Polubavkina, E. Moiseev, M. Maximov, V. Zhurikhina, **S. Scherbak**, A. Lipovskii, M. Kulagina, Y. Zadiranov, I. Mukhin, F. Komissarenko, A. Bogdanov, A. Krasnok, A. Zhukov // Journal of Applied Physics. – 2018. – Vol. 124. – № 16. – P. 163102.
14. Scherbak S.A. Understanding the Second-Harmonic Generation Enhancement and Behavior in Metal Core–Dielectric Shell Nanoparticles / **S.A. Scherbak**, A.A. Lipovskii // The Journal of Physical Chemistry C. – 2018. – Vol. 122. – № 27. – P. 15635-15645.

В приведённых публикациях, выполненных в соавторстве, вклад соискателя заключается в проведении моделирования и расчётов, в теоретическом анализе рассматриваемых проблем, а также в сопоставлении расчетных результатов с экспериментальными данными.

Заслушав доклад Щербака С.А. об основных положениях и результатах выполненного диссертационного исследования, рассмотрев и обсудив содержание диссертации, представляемой автором на защиту, семинар Центра нанотехнологий постановил:

Диссертация «Электродинамическое моделирование резонансных оптических структур» Щербака Сергея Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния».

(Протокол № 3 от «16» июля 2019 г.).

Диссертационная работа рассмотрена и настоящее заключение подготовлено и утверждено научным семинаром Центра нанотехнологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего



образования «Санкт-Петербургского национального исследовательского Академического университета Российской академии наук».

Заместитель Председателя  
семинара Центра нанотехнологий  
Академического университета,  
д.ф.-м.н. Максимов М. В.



Секретарь  
семинара Центра нанотехнологий  
Академического университета,  
к.ф.-м.н. Мухин И. С.

