

УДК 666.227.8

Р. О. Алексеев*¹, В. И. Савинков¹, Г. Н. Атрощенко¹, Г. Ю. Шахгильдян¹, А. Палеари², И. Мартин², В. Н. Сигаев¹

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия, 125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, корп. 1

²Университет Милана-Биккока, Милан, Италия

I-20125 Milano, Italy, Via R. Cozzi 53

* e-mail: alexeev-roma@mail.ru

СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

С помощью плазматронной установки из иттриевоалюмосиликатных стёкол, содержащих ионы редкоземельных элементов, получены сферические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи.

Ключевые слова: оптические микрорезонаторы, моды шепчущей галереи, иттриевоалюмосиликатные стёкла.

Новым развивающимся классом миниатюрных оптических резонаторов, потенциально важных для развития технологий интегральной оптики, являются стеклянные микроструктуры высокой симметрии, которые используются для локализации световых пучков известных как моды шепчущей галереи (МШГ) [1]. Такое название моды получили по аналогии с акустическими модами в Шепчущей галерее собора Святого Павла в Лондоне, которые исследовал и объяснил лорд Рэлей.

Впервые на возможность создания электромагнитных резонаторов с использованием МШГ, возникающих при полном внутреннем отражении от поверхности аксиально-симметричного тела, указал в 1939 году Роберт Рихтмайер [2] (один из руководителей американского проекта водородной бомбы). Как оказалось, излучательная добротность экспоненциально растёт с ростом отношения радиуса резонатора к длине волны и поэтому не препятствует достижению сколь угодно высоких значений добротности. Резонаторы с МШГ СВЧ диапазона получили широкое применение в экспериментальной физике и радиотехнике. Их главной особенностью является высокая добротность, составляющая около 10^8 , которая ограничена СВЧ-поглощением в материале. При уменьшении линейных размеров резонатора (десятки микрометров) и при использовании материала с достаточно малыми собственными потерями оказывается возможным создание высокодобротного оптического диэлектрического микрорезонатора с такими модами. Идея разработки обсуждаемых резонаторов состоит в том, чтобы радикально уменьшить потери при отражении от границ, перейдя от нормального падения лучей к скользкому. Наиболее простой формой резонатора, в которой возможны моды шепчущей галереи, является сферическая. Можно указать на следующие преимущества оптических резонаторов с МШГ по сравнению с традиционными резонаторами типа Фабри-Перо (РФП):

1. Гораздо меньший размер при той же добротности. У РФП добротность линейно зависит от размера, у резонаторов с МШГ излучательные потери падают с размерами экспоненциально. Резонаторы с

размером порядка миллиметров могут иметь ту же добротность, что РФП длиной в десятки сантиметров.

2. Широкий диапазон частот, в котором сохраняется высокая добротность резонаторов с МШГ. Высокодобротные резонаторы Фабри-Перо требуют использование суперзеркал, которые могут работать только в узком интервале частот.

3. Малая чувствительность твердотельных микрорезонаторов с МШГ к механическим воздействиям. У РФП требуется предпринимать специальные меры для обеспечения большой механической жесткости.

4. Тепловое расширение резонатора МШГ задается материалом резонатора. Поэтому резонаторы с МШГ больше подвержены тепловым флуктуациям. С другой стороны, миниатюрный резонатор ШГ проще разместить в стабилизированном термостате, чем крупный РФП [3].

К моменту проведения исследования в подавляющем большинстве лабораторий для изготовления сферических микрорезонаторов использовали высокочистый плавленый кварц. Микрорезонаторы могут быть изготовлены с помощью CO_2 лазера или расплавлением конца обычного одномодового волокна в пламени газовой горелки. Но такие методы имеют ряд недостатков, главным из которых является невозможность достижения однородного температурного поля на поверхности образца. Экспериментально исследованы образцы сферических микрорезонаторов диаметром от 40 до 400 мкм из плавленого кварца, полученных подобным образом. С использованием перестраиваемого одночастотного He—Ne-лазера и призмленного ввода излучения в них наблюдались эффективно возбуждаемые моды ШГ с типичной добротностью $10^7 \div 10^8$. Максимальное значение добротности составило $Q = (3 \pm 0,3) \cdot 10^8$ в одиночном резонаторе диаметром 150 мкм [4].

В нашей лаборатории разработан метод изготовления стеклянных сферических резонаторов с помощью плазматронной установки и получены микросферы стёкол различных диаметров от 20 мкм до 100 мкм в иттриевоалюмосиликатной системе (YAS) с добавлением редкоземельных элементов

(табл. 1). Основными достоинствами этого метода является высокая температура дуги плазматрона (порядка 8000-10000°C), высокая производительность и простота получения микросфер практически

идеальной геометрии (исследуемые микросферы характеризуются относительным отклонением радиусов, меньшим, чем 0,1%).

Таблица 1. Составы стекол YAS системы, содержащих ионы редкоземельных элементов

Обозначение	Состав матрицы стекла (масс.%)	Добавка (сверх 100%)
YAS-Nd	31.4Y ₂ O ₃ -39.5Al ₂ O ₃ -29.1SiO ₂ (масс.%)	Nd ₂ O ₃ (6 масс.%)
YAS-Ho		Ho ₂ O ₃ (7,8 масс.%)
YAS-Nd-Ce		Nd ₂ O ₃ (3,9 масс.%) + CeO ₂ (0,4 масс.%)

В качестве сырьевых материалов использовали реактивы Y₂O₃, SiO₂ и Al₂O₃. Предварительно подготовленные компоненты шихты смешивались в течение двух часов в контейнере из кварцевого стекла. YAS стекла варили в корундовом тигле объемом 100 см³ при температуре 1650°C в специально сконструированной высокотемпературной электрической печи с SiC нагревателями. Длительность выдержки при максимальной температуре, соответствующей полной гомогенизации стекломассы, не превышала 2 ч. Выработка стекол осуществлялась закалкой расплава, вылитого на металлическую плиту и прокатанного цилиндрическими металлическими валками или закалкой в воду.

Каждое стекло измельчали на истирателе с корундовыми дисками до получения мелкодисперсного порошка с размером частиц менее 100 мкм. Полученный порошок просеивали на ситовом анализаторе «Retsch AS 200 basic» с контрольными ситами: 180, 125, 90, 40 и 20 мкм в течение 20 мин. На сфероидизацию отбирали каждую фракцию от 20 до 125 мкм. Сфероидизация порошка

происходила в высокотемпературной плазме на плазматронной установке собственной сборки. После этого стеклянные микросферы подвергали мокрому рассеvu на ситовом анализаторе «Retsch AS 200 control» в течение 20 мин с контрольными ситами: 100, 71, 50, 40, 32 и 20 мкм. В итоге получили микрорезонаторы размером от 20 до 100 мкм.

Измерения микролюминесценции выполнены с помощью спектрометра Labram (JobinYvon) с гелий-неоновым лазером в качестве источника накачки на длине волны 632.8 нм при фокусировке лазерного пучка в пятно размером 10 мкм при помощи оптических компонентов микроскопа (Olympus) и объектива с увеличением 10^x и числовой апертурой 0,25. Испускаемое излучение регистрировалось ПЗС-детектором, охлаждаемым элементом Пельтье, после прохождения полосно-заграждающего фильтра и монохроматора со спектральным разрешением около 0,3 нм. Спектры записывались с одной микросферы при активации сопряжения с МШГ путем направления части пучка лазера на сторону микросферы.

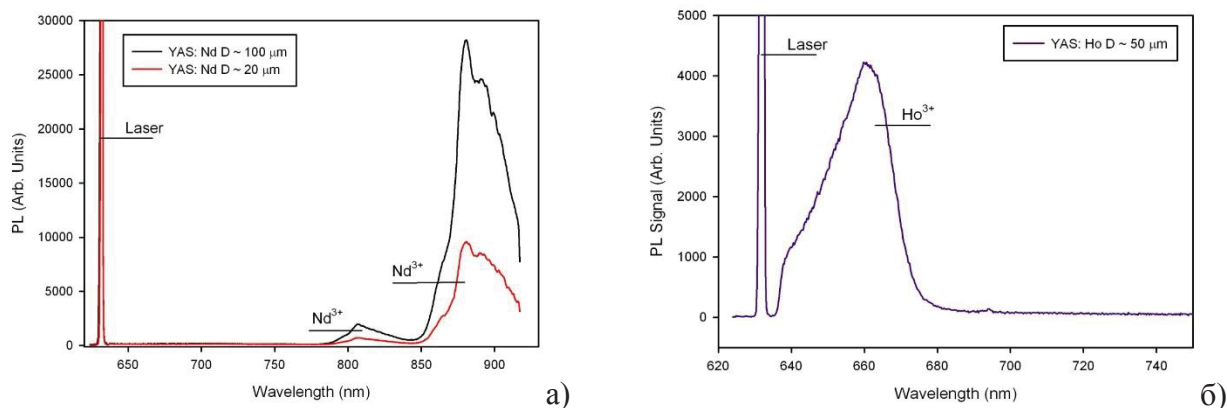


Рис. 1. Типичные спектры люминесценции при возбуждении на 633 нм YAS стеклянных микросфер, содержащих ионы неодима (а) и ионы гольмия (б) при накачке одиночной микросферы.

На рис. 1 приведены полученные спектры микролюминесценции для ряда образцов различного состава (табл. 1). Основной вклад в регистрируемый сигнал вносят излучательные электронные переходы ионов Nd³⁺ и Ho³⁺. Важно отметить, что выборка образцов микросфер различного состава демонстрирует воспроизводимую люминесценцию со сравнимой интенсивностью и спектральными признаками.

В спектрах комбинационного рассеяния света (микро-КРС), зарегистрированных при более высокой – примерно в 100 раз - по сравнению с данными для рис. 1 мощностью возбуждающего лазера, наблюдаются повторяющиеся отклики, соответствующие фоновым модам структуры YAS стекла. Спектры на рис. 2 обнаруживают явное присутствие МШГ как модуляции интенсивности испускаемого излучения (полосы для спектра микросферы диаметром 20 мкм). В частности,

наблюдаемые полосы со спектральным периодом между излучаемым светом и локализованным порядком нм подтверждают возникновение резонанса излучением в одиночной микросфере.

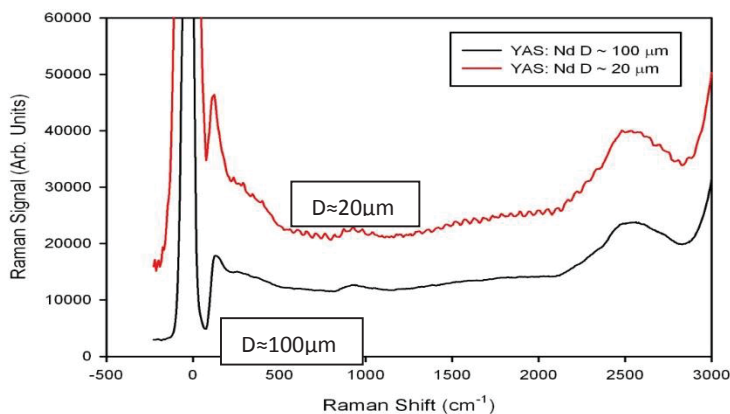


Рис.2. Спектры комбинационного рассеяния света YAS стекломатрицы, наложенные на спектры люминесценции Nd, для одиночной микросферы.

Полученные результаты подтверждают редкоземельного иона в зависимости от размера применимость функционального допирования микросферы. Таким образом, можно допускать матрицы стекла ионами редкоземельных элементов в процессе варки стекла и дальнейшего процесса стекломатрицы. Резонаторы с модами шепчущей сфероидизации стеклянных микрочастиц в галереи могут стать следующим поколением плазматроне. Более того, не обнаруживается резонаторов после резонаторов Фабри-Перо в значительного изменения окружения микрооптике.

Сигаев Владимир Николаевич д.х.н., зав. кафедры химической технологии стекла и ситаллов РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва

Альберто Палеари профессор кафедры экспериментальной физики Университета Милана-Бикокка

Иноченчио Мартин профессор Университета Де Ла Лагуна, Испания

Алексеев Роман Олегович студент кафедры химической технологии стекла и ситаллов

Атросченко Григорий Николаевич к.т.н. сотрудник Международного центра лазерных технологий

Шахгильдян Георгий Юрьевич аспирант кафедры химической технологии стекла и ситаллов

Савинков Виталий Иванович к.т.н., с.н.с. Международного центра лазерных технологий

Литература

1. G. C. Righini, Y. Dumeige, P. Féron, M. Ferrari, G. Nunzi Conti, D. Ristic, S. Soria, Whispering gallery mode microresonators: Fundamentals and applications, Riv. Nuovo Cimento 2011, 34, 435-488.
2. R. D. Richtmyer. Dielectric resonators. Journal of Applied Physics, 10:391-398, 1939.
3. М. Л. Городецкий. Основы теории оптических микрорезонаторов. Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, 2010 с. 203.
4. V. B. Braginsky, M. L. Gorodetsky, and V. S. Ilchenko. Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering gallery modes. Physics Letters A, 137:393-397, 1989.

*Alexeev Roman Olegovich**¹, *Savinkov Vitaliy Ivanovich*¹, *Atroschenko Grigoriy Nikolaevich*¹, *Shakhgil'dyan Georgiy Yur'yevich*¹, *Alberto Paleari*², *Inocencio Martin*², *Sigaev Vladimir Nikolaevich*¹

¹D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia.

²University of Milano-Bicocca, Milan, Italy

* e-mail: alexeev-roma@mail.ru

SYNTHESIS OF OPTICAL WHISPERING GALLERY MODE MICRORESONATORS

Abstract

Spherical whispering gallery mode microresonators with a high quality factor were obtained by plasmatron installation on the basis of YAS glasses, doped with ions of rare earth elements.

Key words: optical microresonators, whispering gallery mode, YAS glasses.