

МЫЛЬНЫЕ ПУЗЫРИ КАК ЛАЗЕРНЫЕ МИКРОРЕЗОНАТОРЫ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

Шишацкий М.Н.

МАОУ «Гимназия №13 «Академ», 11 класс

Руководители: Герасимова Н.Д., МАОУ «Гимназия №13 «Академ», учитель физики;

Герасимов В.П., КНЦ СО РАН, отдел молекулярной электроники научный

Актуальность, новизна и практическая значимость. В век больших скоростей, большого потока информации возрастает потребность в большей мобильности данных, повышении скорости их обработки. Существующие системы, основанные на передаче информации, преобразованной в электрический сигнал, достигают предела своего развития. Использование фотонов, как носителей информации, позволит передавать данные с большей скоростью, меньшими потерями и потреблением энергии при меньшей стоимости. В связи с этим стала актуальной разработка малогабаритных оптических устройств, удовлетворяющих данным критериям.

Разработка объектов, имеющих микро- и наноразмеры, является наиболее привлекательной: группировка молекул определенным образом позволяет создать материалы и устройства с заданными свойствами. Использование такого потенциала как микрофотонная платформа, которая характеризуется компактностью, расходом малой мощности, функциональной интегрируемостью с другими оптоэлектронными устройствами, делает микроисточники света подходящим кандидатом для нано- и микроустройств [1].

Взаимодействие излучения лазера с веществом на такой микроплатформе позволяет запустить множество механизмов, одним из которых является флюоресценция молекул и генерация излучения микрорезонаторов.

В работах [2, 3, 13] содержится описание результатов, полученных первыми экспериментаторами, по исследованию оптического резонатора нового типа – диэлектрического микрорезонатора с модами типа «шепчущей галереи» (МШГ), являющегося потенциально важным для развития интегральной оптики.

В своей исследовательской работе авторы впервые предложили экспериментальное моделирование взаимодействия излучения лазера со смесью микропузырей, созданной на основе моющего средства и лазерного красителя Родамин 6G. Микропузыри, ввиду своей высокой симметрии, обусловленной поверхностным натяжением, могут быть использованы в качестве резонаторов

в лазере типа «шепчущей галереи» в микроэлектронике.

Все это обуславливает актуальность, новизну и практическую значимость выбранной темы исследования.

Постановка и формулировка проблемы: Оптоэлектроника становится все более и более важной для информационно-коммуникационных технологий, поэтому существует потребность в разработке оптоэлектронных устройств, которые могут быть интегрированы со стандартной кремниевой микроэлектроникой.

В дополнение к этим устройствам, источники света, такие как лазеры и светодиоды, являются также важными изделиями интегрированных оптоэлектронных схем. Несмотря на высокие эффективные выходные параметры светоизлучающего лазера и усиления в оптическом диапазоне в нанокристаллах (на основе кремния) [2–3], разработка оптоэлектронных устройств на основе пластичных микровключений в микроинтегральные оптические устройства недостаточно развита.

Разработанность исследуемой проблемы: Оптические микрорезонаторы и микролазеры в настоящее время имеют большое применение в приложениях оптических средств связи, интегрированной оптике [4–6]. Так, на основе микрорезонаторов «галереи шепчущих мод» с использованием различных геометрических конфигураций – диски, цилиндры, кольца, тороиды, спирали, сферы, были созданы различные устройства [7]. Одним из последних достижений является создание особого излучателя [8]. Британские и китайские физики смогли разместить внутри кремниевого микрочипа особый излучатель – так называемую оптическую воронку, испускающую «закрученный» свет, который можно использовать для создания оптических «щипцов», захватывающих и перемещающих живые клетки или капли жидкости. Эти оптические воронки настолько малы и компактны, что кремниевые чипы с тысячами таких устройств можно изготавливать за очень небольшое время. Подобные интегральные схемы и устройства могут открыть но-

вые сферы для применения. Сы-юань и его коллеги пытались создать миниатюрную версию оптической воронки – экзотического устройства, способного «закручивать» свет и заставлять его двигаться по спирали, а не по прямой линии (рис.1). Как правило, подобные воронки представляют собой сложные опто-механические устройства, которые невозможно уменьшить до размеров, сопоставимых с микрочипами. Авторы статьи решили эту проблему при помощи колец-резонаторов, основанные на эффекте шепчущих галерей.

Как объясняют Сы-юань и его коллеги, шепчущие галереи способны генерировать «закрученное» электромагнитное излучение, однако его нужно извлечь и заставить двигаться по спирали. В ходе своих экспериментов физики перебрали несколько вариантов конструкции излучателя, пока не обнаружили, что с этой задачей справляется набор из зубцов со строго отмеренной толщиной и длиной, приклеенных к кольцу резонатора. По словам исследователей, подобная структура генератора оптической воронки легко поддается миниатюризации и может быть уменьшена до нескольких микрометров. Такие размеры колец-резонаторов сопоставимы с габаритами транзисторов в современной микроэлектронике, что позволяет интегрировать их в кремниевые

микрочипы в процессе их производства. Для проверки работы воронок ученые изготовили микрочип с тремя резонаторами и подключили его к источнику питания. Как и ожидали физики, устройство генерировало три concentрических столба света, закрученных в спирали.

Сы-юань и его коллеги полагают, что их изобретение может быть использовано для производства микроскопических «оптических щипцов», способных захватывать отдельные клетки, частицы вирусов, капли жидкостей или крупные молекулы белков. Кремниевые чипы с сотнями или тысячами подобных резонаторов будут многократно ускорять скорость анализа образцов в биологических лабораториях. Как отмечают физики, сфера применения оптических воронок не ограничивается наукой – их можно использовать для кодирования и передачи информации через оптические системы связи, или в качестве одного из компонентов квантовых компьютеров.

В работе [9] авторы исследовали процесс преобразования поляризации излучения. Было продемонстрировано эффективное преобразование линейно поляризованного света в ортогональную поляризацию, используя резонатор микросферы кремния, соединенной с оптическим волокном (рис. 2).

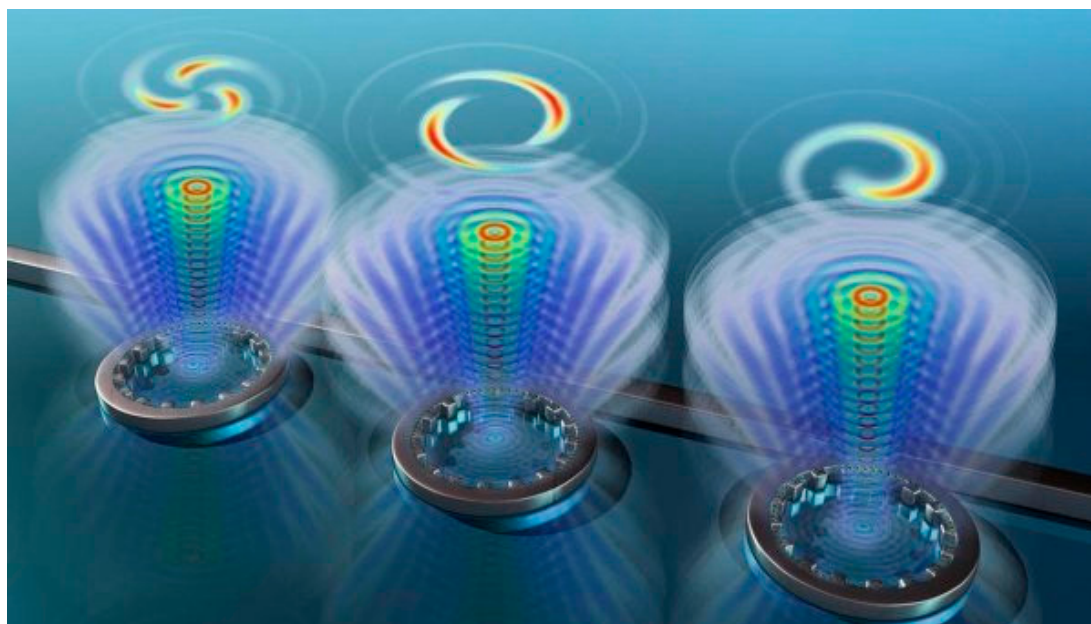


Рис. 1. Иллюстрация «закрученного» света микрорезонаторами на основе «галереи шепчущих мод». В качестве микрорезонаторов использовались кольца

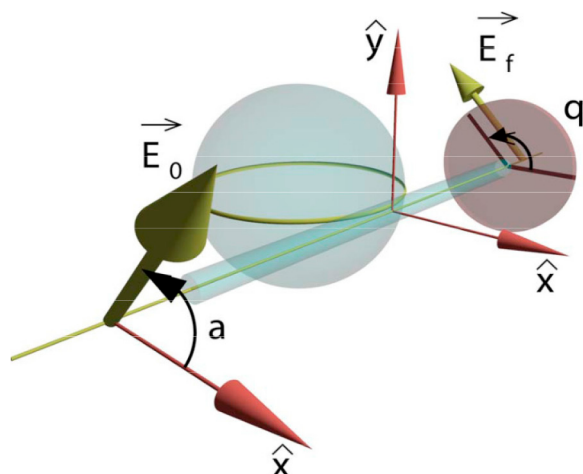


Рис. 2. Графическое представление преобразования поляризации

Примечание. Шар служит в качестве микрорезонатора типа «галереи шепчущих мод». E_0 – вектор линейной поляризации входного излучения, E_f – вектор линейной поляризации выходного излучения. Между векторами E_0 и E_f – угол преобразования.

Важной проблемой в нанофотонике является дизайн новых микродатчиков, позволяющих проанализировать динамику ДНК и белков в клетках тела. Кроме того, такие микродатчики (микросенсоры) могут осуществлять гормональный контроль, исследовать наноматериалы для целенаправленной доставки лекарственных средств, имплантаты (искусственные сосуды, органы, электронные устройства, внедренные в человеческие органы), и обнаружить антигена, бактерии, вирусы, в сыворотке крови в режиме реального времени. К таким микросенсорам авторы [10] в своих исследованиях по медицинской физике относят микрорезонаторы типа «галереи шепчущих мод». Анализ экспериментальных данных зависимости оптических резонансных спектров от концентрации состава биологических растворов позволяет моделировать плазму крови, а также «индикаторы» болезни и следы вирусов. Авторы наблюдали существенные изменения в оптических резонансных спектрах мод «шепчущей галереи», связанных как с изменением макроскопических параметров, так и с возможным взаимодействием между поверхностью микросферы и компонентами биологического раствора. Данное направление относится к исследованию параметров активного формирования генетического материала живой клетки. Эффект взаимодействия микрорезонатора с биораствором лежит в основе сверхчувствительного рецептора и служит для идентификации биологических объектов.

В данной работе предпринята попытка смоделировать и создать оптический ми-

крорезонатор на основе пленкообразующих веществ. В совокупности с лазерными красителями предложенный вид оптических микрорезонаторов может быть использован в лазере типа «шепчущей галереи» в микроэлектронике.

Цель работы заключалась в создании и изучении лазерных резонаторов с модами типа шепчущей галереи на основе пенящегося средства и лазерного красителя Родамин 6G.

Основные задачи:

- создание экспериментальной установки применительно к нашим образцам;
- получение оптимального состава взбитой смеси на основе моющего средства и лазерного красителя Родамин 6G;
- регистрация генерации лазерного излучения на молекулах лазерного красителя Родамин 6G во взбитых смесях.

Объектом исследования являлась взбитая смесь, состоящая из микропузырей, содержащих молекулы лазерного красителя Родамин 6G, в роли микрорезонаторов.

Методы решения основных задач: оптические методы (методы оптоэлектронной регистрации, методы работы с оптическими приборами), физико-химические методы анализа по работе с химическими веществами.

Исследование проводилось на базе лаборатории молекулярной спектроскопии Института физики СО РАН.

Основная часть

Теоретическая часть

Волны «шепчущей галереи». В мире известно множество строений, облада-

ющих следующей особенностью: шёпот в них хорошо распространяется вдоль стен, но не слышен в остальной части помещения. Поэтому их называют «шепчущими галереями». Обычно такие помещения имеют круглую или эллиптическую форму. В помещениях круглой формы шёпот стоящего у стены человека будет слышен вдоль стен, но не в центре помещения. В помещениях эллиптической формы слова, произнесенные шёпотом в одном из фокусов эллипса, будут услышаны только в другом фокусе, но не в остальном помещении, причем шёпот будет услышан, даже если расстояние между фокусами весьма существенно [11].

Современное физическое объяснение эффекта дал Рэлей более ста лет тому назад. Он основывался на собственных наблюдениях, сделанных в старинной шепчущей галерее, находящейся под куполом собора святого Павла в Лондоне. При этом концентрация лучей, прошедших по разным большим дугам купола, имеющего форму полусферы, и вследствие этого усиление звука должны происходить только в точке, диаметрально противоположной источнику звука.

Рэлей заметил, что помимо этого эффекта существует еще один: звук цепляется за поверхность стены и ползет вдоль нее, причем необязательно вдоль кратчайшей дуги, соединяющей источник и приемник, а скорее вдоль дуги, к которой шепчущий обращен лицом. Роль вогнутой поверхности купола сводится к тому, что она не дает сечению пучка расширяться так же быстро,

как при распространении в свободном пространстве.

Если в последнем случае сечение пучка растет пропорционально (ρ – расстояние от источника), а интенсивность излучения падает пропорционально $1/\rho^2$, то в шепчущей галерее излучение заключено в узком слое, примыкающем к поверхности. В результате интенсивность звука внутри этого слоя падает лишь пропорционально ρ , то есть значительно медленнее, чем в свободном пространстве. Это и есть объяснение Рэрея. Он подтвердил его прямыми экспериментами, используя свисток как источник звука, а горящую свечу как приемник.

Соответствующий физический эффект, состоящий в распространении волн вблизи изогнутых границ раздела двух сред, извещен и в других волновых процессах, включая распространение света (рис. 3). Распространение «шепчущей волны» похоже на явление полного внутреннего отражения, однако в виду того, что поверхность боковых стенок резонатора не ровная, а имеет некий радиус кривизны, распространения с полным отражением не бывает. Часть волны просачивается наружу. Однако, чем больше радиус кривизны, тем больше излучения остается внутри. Длина волны видимого диапазона, как известно, менее 1 мкм. Это означает, что в «шепчущем резонаторе», радиус кривизны основания которого около 10 мкм, может существовать «шепчущая волна».

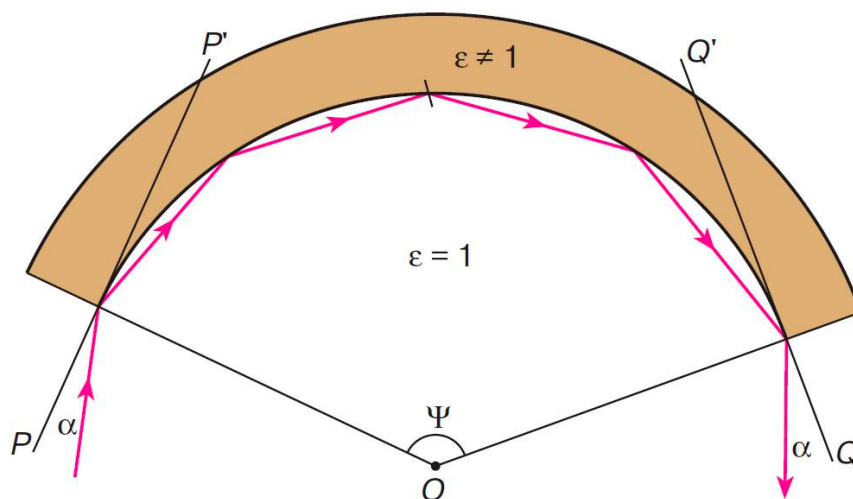


Рис. 3. Волна шепчущей галереи у поверхности вогнутого зеркала

Примечание: стрелками указаны направления входа и выхода волны. О – центр кривизны зеркала, α – угол скольжения, PP' и QQ' – касательные к поверхности зеркала.

Моды «шепчущего резонатора» обладают большой добротностью, так что даже небольшое отклонение частоты резонансного возбуждающего поля от собственной частоты моды, ведет к уменьшению ее амплитуды и затуханию. Одной из проблем, которая возникает при использовании резонаторов такого типа, является ненаправленность выходного излучения. Ввиду того, что резонатор симметричен, излучение с равной степенью вероятности может выходить из него под разными углами. Это существенный недостаток. Этот недостаток исправим в эллиптических микрорезонаторах. В таком случае излучение выходит в одном направлении.

Лазеры на органических красителях. В качестве активной среды лазера используются лазерные красители, одним из которых является Родамин 6G [12]. Когда краситель возбуждается внешним источником коротковолнового излучения, он излучает на более длинных волнах или флуоресцирует, поглощая фотон на длине волны возбуждения, а затем излучая фотон на длине волны флуоресценции.

На рис. 4 приведены спектры поглощения (1) и флуоресценции (2) типичного лазерного красителя.

Кривая флуоресценции (2), захватывающая желтую и большую часть красной области спектра, сдвинута в более длинноволновую область по отношению к кривой поглощения, занимающей голубой и зеленый участки спектра. Существенное различие заключается в том, что краситель флуоресцирует в исключительно широком диапазоне частот видимой области спектра в противоположность очень узкой полосе флуоресценции типичного твердотельного лазера.

Экспериментальная часть

Экспериментальная установка. Для исследования излучения микрорезонаторов типа «галереи шепчущих мод» была создана следующая установка (рис. 5).

Импульсный лазер (1) с длиной волны $\lambda=532$ нм использовался в качестве источника света. Энергия в импульсе составляла $E=0,01$ Дж. Лазер генерировал излучение в режиме модулированной добротности в импульсном режиме. Длительность импульсного излучения составляла 10 нс. Частота повторения импульсов лазерного излучения – 25 Гц. Режим генерации – одномодовый.

Основное излучение фокусировалось линзой (2) ($f=7$ см) и далее взаимодействовало объектом (3) – взбитой смесью.

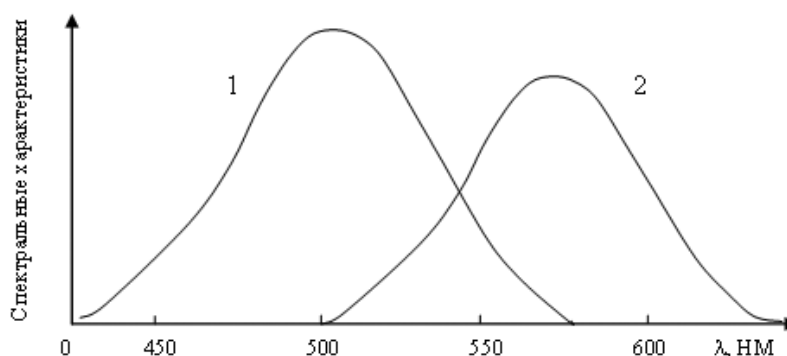


Рис. 4. Спектр поглощения и флуоресценции лазерного красителя

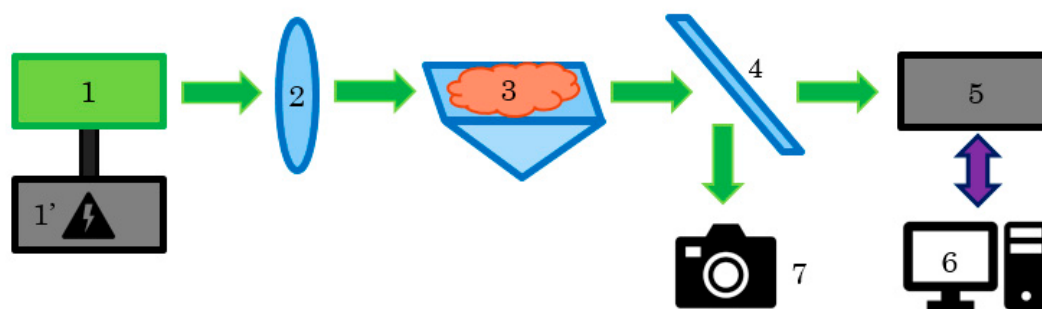


Рис. 5. Схема экспериментальной установки:

1 – импульсный лазер $\lambda=532$ нм, 1' – источник питания импульсного лазера, 2 – собирающая линза ($f=7$ см), 3 – объект исследования (взбитая смесь), 4 – зеркало (50%), 5 – спектрофотометр C-115–M1, 6 – компьютер, 7 – фотокамера

Взбитая смесь (микрорезонаторы размером от 0,5 до 30 мкм) состояла из поверхностно-активных веществ (мыльный раствор) и лазерного красителя родамин 6G.

Визуальное наблюдение динамики происходящих процессов во взбитой смеси позволяло при необходимости варьировать параметрами излучения лазера и оперативно изменять конфигурацию оптических элементов установки.

Для регистрации спектров пропускания и излучения лазера использовали монохроматор в составе спектрофотометра C-115–M1 (5). Разрешение спектрофотометра составляло 0,1 нм. Сигнал с ФЭУ поступал на компьютер (6).

Получение взбитой смеси. Для создания микрорезонаторов типа «галереи шепчущих мод» использовалась смесь на основе глицерина, моющих средств и лазерного красителя Родамин 6G. Использование глицерина позволяет сохранять толщину тонкой плёнки в течение долгого времени (от нескольких минут до суток). В качестве плёнообразующего вещества использовали жидкое мыло (ГОСТ Р. 52345–2005). Раствор размешивался вручную.

Для разных вариантов исследования поведения мыльных микропузырей использовали различные составы. Состав исследуемых плёнок: химреактивы – глицерин (от 5% до 30%), плёнообразующее химическое соединение (раствор жидкого мыла – до 60%), вода (3%), ксантеновые красители – родамин 6G (этанольный раствор) – менее 1% с молярной концентрацией $3 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Исходная концентрация красителя в 50 мл этанола составила $7,2 \cdot 10^{-3}$ г. В качестве поверхностно-активных веществ использовалась следующая смесь:

1. лауретсульфат–детергент, поверхностно-активное вещество $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{CH}_2(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_n\text{OSO}_3\text{Na}$, $\text{C}_{12+2n}\text{H}_{25+4n}\text{NaO}_{4+n}\text{S}$ – химическая формула, 420 г/моль – молярная масса,

2. кокамидопропилбетаин, химическая природа – мягкий амфотерный ПАВ, полученный из кокосового масла,

3. cocamide DEA, химическая природа – мягкий амфотерный ПАВ, полученный из кокосового масла.

Для эксперимента использовали микрорезонаторы, приготовленные с различным процентным соотношением приведенных реактивов. Далее смесь взбивалась пластиковым цилиндром до получения однородной смеси, в ходе чего образовывались пузырьки диаметром менее 50 мкм, являющиеся микрорезонаторами «шепчущей галереи».

В ходе эксперимента полученная (взбитая) нами смесь наносилась на одну из боковых сторон кварцевой призмы. При воздействии импульсного излучения (вторая гармоника неодимового лазера с $\lambda=532$ нм) в смеси наблюдалось яркое свечение в желто-оранжевом диапазоне красителя Родамин 6G.

Заключение

Нами были прописаны спектры возбуждающего излучения, спектр люминесценции лазерного красителя Родамин 6G, а также спектры излучения генерации «галереи шепчущих мод».

На спектре (рис.6а) наблюдаем линию возбуждения красителя (родамин 6G) излучение второй гармоникой неодимового лазера с длиной волны $\lambda=532$ нм. На спектре (рис.6б) показана регистрация флуоресценции раствора красителя родамин 6G в этаноле. Мы наблюдаем полосу флуорес-

ценции в полосе возбуждения молекул красителя. Зависимости на рис.6(c,d) дают нам распределение излучения взбитой смеси. Полуширина излучения лазера составляет порядка 0.1 нм. Максимальная полуширина – до 0.2 нм.

Создана экспериментальная установка по исследованию микрорезонаторов «шепчущей галереи»;

Исследован процесс создания взбитой смеси на основе моющих средств и лазерного красителя Родамин 6Ж;

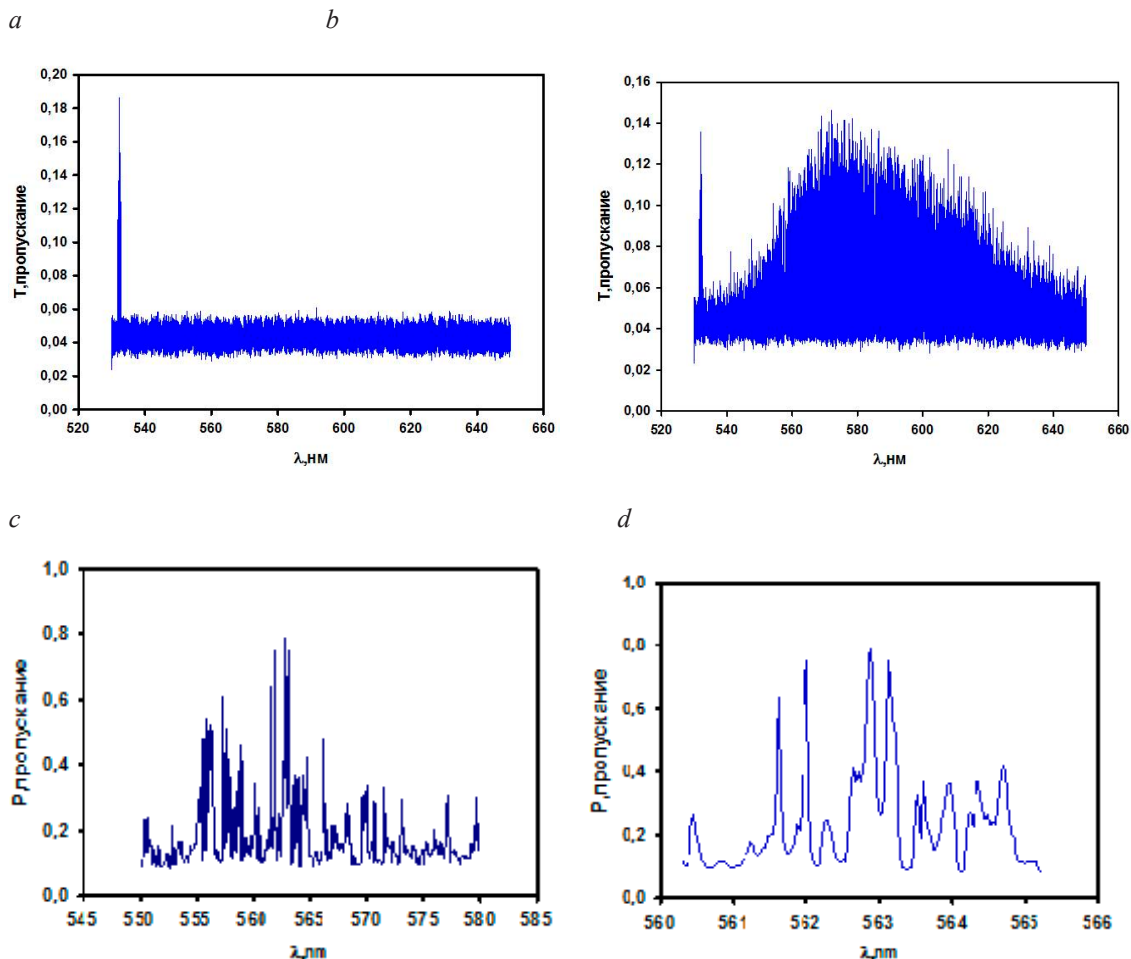


Рис. 6. Зарегистрированные спектры:

a – спектр возбуждающего излучения; *b* – спектр генерации красителя Родамин 6Ж;
c, d – спектры излучения на микрорезонаторах. Пропускание *d* показано в интервале длин волн 566–565 нм

Следует отметить, что взбитая смесь состояла из мыльных пузырьков разного диаметра. Поэтому, в спектрах мы наблюдаем различные расстояния между центральными ли-

ниями и хаотичный разброс по амплитудам. Данное излучение распространяется во все стороны взбитой смеси рабочего раствора. Наличие тонких линий (всплесков) подтверждает существование излучения лазера типа «галереи шепчущих мод».

Выводы

В ходе экспериментальной работы были выполнены следующие задачи:

Зарегистрировано излучение лазера на микрорезонаторах типа «галереи шепчущих мод».

Предложенный способ создания микрорезонаторов представляет интерес в связи с практической значимостью данных устройств в микрооптоэлектронике.

Данная модель представляет интерес как объект для дальнейшего исследования. В перспективе мыльная пленка может

быть заменена пластичной пленкой. Такой микрорезонатор может быть интегрирован во многие микро- и нанооптоэлектронные системы, такие как оптический или оптоэлектронный компьютер, гибкие информационные экраны, медицинские микродатчики и т.д.

Список литературы

1. Himeno A., Kato K., Miya T. IEEE // J. Sel. Top. Quantum Electron. 4, 913 (1998).
2. Green A., Zhao J., Wang A., Reece P.J., Gal M. Efficient silicon light-emitting diodes // Nature (London) 412, 805 (2001).
3. Pavesi L., Dal Negro L., Mazzoleni C., Franz G., Priolo F. Optical gain in silicon nanocrystals // Nature (London) 408, 440, (2000).
4. Garrett C.G.B., Kasier W., Wond W.L. Stimulated. Emission into Optical Whispering. Modes of Spheres // Physics Letters, 124, 1807 (1961).
5. Wanga Q., Yana C., Yua N. // J. Unterhinninghofenb, J. Wiersigb, C. Pflugla, Whispering-gallery mode resonators for highly unidirectional laser action, PNAS. – December 28, 2010 / vol. 107 / no. 52 / 22407–22412.
6. Городецкий М.Л., Вятчанин С.П., Ильченко В.С., Перестраиваемые узкополосные оптические фильтры с модами типа шепчущей галереи // Журнал прикладной спектроскопии. – 1992. – 56. – 274–280.
7. Das A.J., Lafargue C., Lebental M., Zyss J., Narayan K.S. Three-dimensional microlasers based on polymer fibers fabricated by electrospinning // Applied physics letters. – 2011. – 99, 263303.
8. Cai X., Wang J., Strain M.J., Johnson-Morris B., Zhu J., Sorel M., O'Brien J.L., Thompson M.G., Yu S. Integrated Compact Optical Vortex Beam Emitters // Science. – 2012. – V.338; 19.
9. Bianucci P. Fietz C.R., Robertson J.W., Shvets G., Shih C.-K. Whispering gallery mode microresonators as polarization converters // Optics letters. – 2007. – Vol. 32, № 15.
10. Tcherniavskaia E.A., Saetchnikov V.A. Detection and identification of microparticles/nanoparticles and blood components using optical resonance of whispering-gallery modes in microspheres // Journal of Applied Spectroscopy. – 2010. – Vol. 77, № 5.
11. Виноградов А.В., Ораевский А.Н. Волны шепчущей галереи // Соросовский образ. жур. – 2001. – Т.7, № 2.
12. Земский В.И., Колесников Ю.Л., Мешковский И.К. Физика и техника импульсных лазеров на красителях. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 176 с.
13. Moon H.-J., An K. Interferential coupling effect on the whispering-gallery mode lasing in a double-layered microcylinder // Applied physics letters. – 2002. – V. 80, № 18. – P. 3250–3252.