

УДК 681.7.05

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2020 г. К. Н. Миньков<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> *Всероссийский НИИ оптико-физических измерений  
Россия, 119361, Москва, ул. Озерная, 46*

<sup>b</sup> *Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова  
Национального исследовательского университета “Высшая школа экономики”, Москва, Россия*

\*e-mail: k.n.minkov@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.

После доработки 06.12.2019 г.

Принята к публикации 12.12.2019 г.

Описана установка для изготовления оптических диэлектрических микрорезонаторов из кварцевого стекла термическим методом. Отличительной особенностью данной установки является возможность автоматизированного изготовления резонаторов с заданными диаметром и отклонением между плоскостью, касательной к экватору резонатора, и осевой линией ножки. Приведены результаты сравнения “ручной” и механизированной технологии изготовления резонаторов, демонстрирующие преимущества последней.

DOI: 10.31857/S0032816220030131

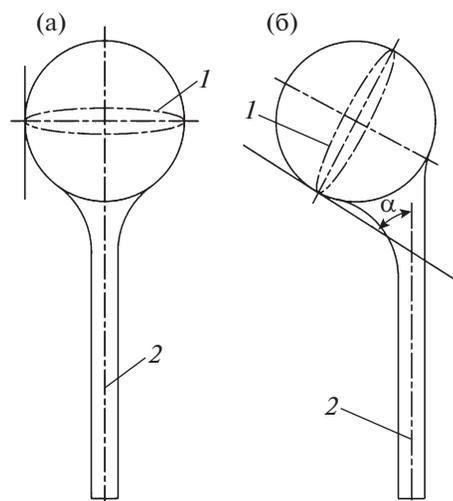
### ВВЕДЕНИЕ

С момента изобретения [1] оптические диэлектрические микрорезонаторы (далее – резонаторы) с модами “шепчущей” галереи нашли широкое применение в качестве модуляторов [2, 3], эталонов для стабилизации частоты лазеров [4], мнорезонаторных структур [5], детекторов наночастиц [6] и т.д. Оптический резонатор представляет собой тело вращения, изготовленное из оптически прозрачного диэлектрика (рис. 1) диаметром от нескольких миллиметров до десятков микрометров.

Подобные резонаторы обладают уникальными характеристиками, такими как высокая добротность, возможность перестройки частоты моды, миниатюрные размеры, низкий порог проявления нелинейных эффектов. Среди них наиболее важной характеристикой является добротность  $Q$ , которая ограничивается потерями [7], связанными с поглощением света в материале, рассеянием на оптических неоднородностях в объеме резонатора и вблизи его поверхности, потерями на связь.

Для широкого применения резонаторов необходима разработка доступной методики производства, которая обеспечивала бы минимальные затраты времени, а также высокую воспроизводимость геометрических размеров и высокую добротность изготовленных резонаторов.

Наиболее распространенными методами изготовления резонаторов являются методы литогра-



**Рис. 1.** Схематическое изображение резонаторов с характерным диаметром от нескольких миллиметров до десятков микрометров. Резонаторы с различными угловыми отклонениями между плоскостью, касательной к экватору резонатора, и осевой линией ножки: а – резонатор без отклонения (плоскость параллельна оси); б – резонатор, имеющий наклон плоскости, касательной к экватору, относительно осевой линии ножки. 1 – экватор резонатора; 2 – осевая линия ножки;  $\alpha$  – угловое отклонение.

фии [8], механической [9] и термической обработки [6] материалов.

Резонаторы, изготовленные методом литографии, отличаются высокой локализацией поля и воспроизводимостью диаметра. Однако в большинстве случаев имеют среднюю добротность ( $Q \sim 10^4 - 10^7$ ), при этом реализация литографического способа изготовления требует применения дорогостоящего оборудования и отлаженной технологии производства. Резонаторы, изготовленные методом механической обработки материалов, обладают наивысшей добротностью, до  $Q \sim 3 \cdot 10^{11}$  [10], хорошей локализацией поля и воспроизводимостью диаметра, однако изготовление таких резонаторов занимает много времени и требует привлечения высококвалифицированного персонала. После изготовления резонатора на станке требуется дополнительная асимптотическая полировка, которая проводится вручную, что ухудшает воспроизводимость размеров.

Резонаторы, изготавливаемые методом термической обработки из плавленного кварца, имеют высокую добротность  $Q \sim 10^9$ . Оборудование, необходимое для изготовления подобных резонаторов, существенно дешевле. Недостатком этого метода является то, что он применим только к стеклообразным материалам, кроме того, подобные резонаторы имеют разные геометрические размеры. Для достижения температуры, необходимой для плавления кварца, можно использовать нагрев в пламени кислородно-водородной смеси (к.в.с.) [6], разряд электрической дуги [11] или нагрев с помощью мощного  $\text{CO}_2$ -лазера [12].

Формирование теплового поля с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера при изготовлении резонаторов приводит к возникновению градиента температур вдоль заготовки, в результате этого форма резонатора может отличаться от сферической. Чтобы минимизировать влияние градиента температуры, можно поместить резонатор в круглую сапфировую трубку, однако полностью лишиться градиента не удастся.

Создание теплового поля за счет электрической дуги сопровождается испарением материала электродов. Это приводит к загрязнению резонаторов в момент изготовления, в результате чего их добротность оказывается невысокой.

Формирование теплового поля в пламени к.в.с. позволяет избежать загрязнения поверхности резонатора. Первоначально при их изготовлении в пламени к.в.с. использовали цилиндрические заготовки с последующим втягиванием и оплавлением самого резонатора [13]. Результат работы сильно зависит от умения оператора, поэтому резонаторы могут различаться формой и угловым отклонением между плоскостью, касательной к экватору резонатора, и осевой линией ножки (рис. 1).

Резонаторы с минимальными отклонениями в геометрических параметрах могут успешно применяться, например, для детектирования наночастиц или биологических объектов, где это особенно важно, так как резонатор является сменным одно-разовым чувствительным элементом [6].

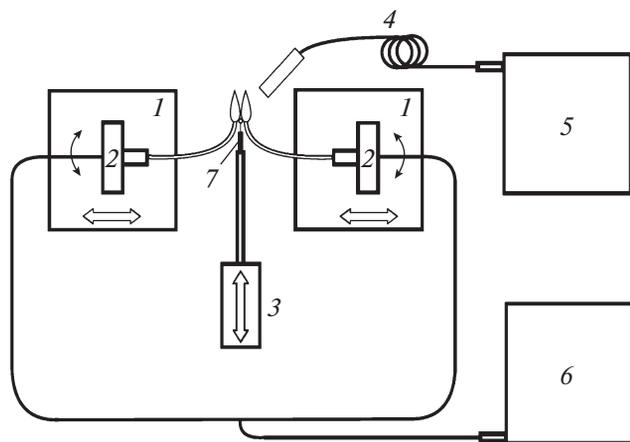
Автором данной статьи была экспериментально продемонстрирована возможность приготовления резонаторов из плавленного кварца с добротностью  $Q = 10^9$  на длине волны 640 нм [6]. В цели данной работы входило создание установки и отработка автоматизированной технологии изготовления партии резонаторов термическим способом с минимальными отклонениями от заданных геометрических параметров: диаметра и углового отклонения.

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗОНАТОРОВ

Схема разработанной установки для изготовления резонаторов представлена на рис. 2. Она выгодно отличается от подобных установок тем, что резонаторы изготавливаются с применением кругового нагрева. Предварительно были исследованы разные варианты кругового нагрева заготовок. В первом варианте предполагался нагрев с восьми сторон соплами  $\varnothing 0.6$  мм. Однако проведенные исследования показали, что точно настроить такую систему крайне сложно. В другом варианте заготовки нагревали посредством кругового щелевидного сопла, однако нестабильность работы приводила к ее перегреву. Проведенные экспериментальные исследования показали, что резонаторы можно изготавливать при очень больших потоках газа. В связи с этим был предложен способ нагрева с помощью двух сопел с увеличенным диаметром, что позволило увеличить и количество энергии, сообщаемое заготовке в единицу времени.

В данной установке для нагрева заготовки используются два сопла, расположенных таким образом, что потоки пламени пересекаются, уравновешивая силы, действующие на заготовку с разных сторон. Это позволяет изготавливать резонаторы с высокой повторяемостью и с минимальным наклоном.

Для точного позиционирования сопел используются поворотные столики. Процесс настройки контролируется с помощью видеокамеры, наблюдая процесс на экране монитора. Источником к.в.с. является электролизная установка ЛИ-ГА 02С. По пути к соплам газовая смесь проходит через водный затвор и редуктор, позволяющий точно регулировать поток газа. Формирование пламени происходит при помощи сопел, представляющих собой изогнутые по шаблону прока-



**Рис. 2.** Схема установки для автоматизированного изготовления резонаторов. 1 – микрометрическая подвижка МТ1В/М (Thorlabs); 2 – поворотные уголки КМ100 (Thorlabs); 3 – микрометрическая подача 7Т173 (Standa); 4 – сопло пламени гасителя; 5 – компрессор; 6 – электролизная установка ЛИГА 02С; 7 – держатель заготовки.

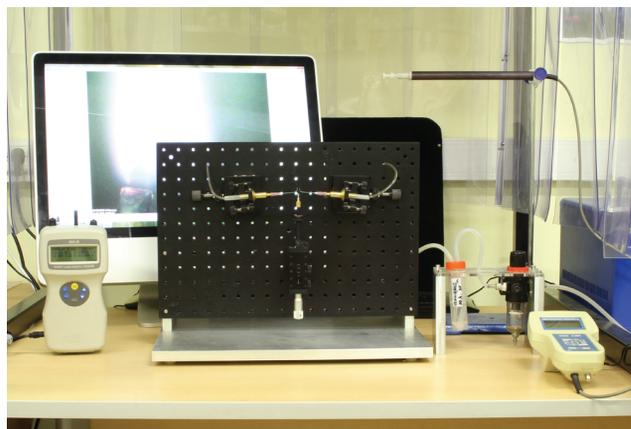
ленные медицинские иглы с внешним диаметром 1.2 и длиной 40 мм.

При использовании сопел больших диаметров можно получить резонаторы больших размеров, что может быть использовано для создания гироскопов на эффекте Саньяка [9], где отклик зависит от площади контура.

Для обеспечения жесткости конструкции установки ее элементы расположены на несущей плите МВ3045/М (Thorlabs, США). Эта плита с помощью кронштейнов закреплена на основании, изготовленном из дюралюминия Д16Т. Микрометрическая подача 7Т173 (Standa, Латвия) является съемной, что обеспечивает удобство установки/изъятия резонатора из держателя. Держатель образца – цилиндр с цанговым зажимом на конце, в который зажимается патрон, удерживающий при помощи резиновых колец заготовку волокна. Держатель крепится к микрометрической подаче винтами М6.

Симметрично относительно заготовки располагаются два микрометрических столика МТ1В/М (Thorlabs, США). На подвижные площадки столиков устанавливают поворотные уголки КМ100 (Thorlabs, США), в которые вставляются и фиксируются шпильками направляющие сопел.

К направляющим с одной стороны подключают патрубки от электролизной установки 6, а с другой – сопла. Для визуализации изображения используется видеочка, закрепленная на штативе. Внешний вид установки показан на рис. 3.



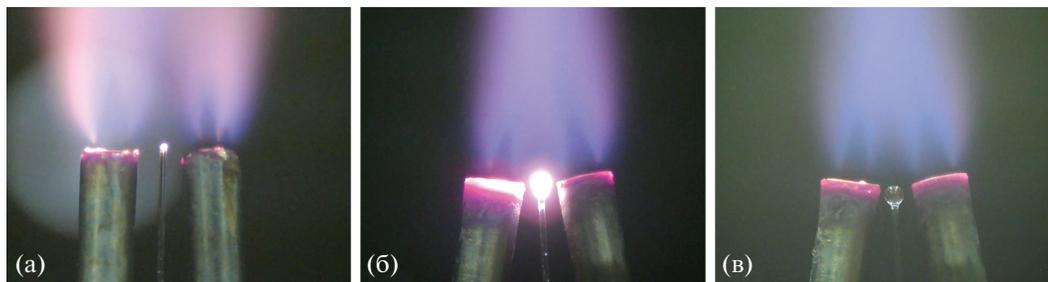
**Рис. 3.** Внешний вид установки для изготовления резонаторов.

## МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗОНАТОРОВ

Методика изготовления высокочастотных микрорезонаторов на созданной установке включает ряд последовательных действий, которые пошагово выполняет оператор. В качестве заготовки для вытягивания использовалось кварцевое одномодовое волокно SM600 (Thorlabs, США). Технология изготовления волокна хорошо отлажена, его диаметр и показатель преломления известны с достаточно высокой точностью, что позволяет механизировать процесс изготовления.

Перед началом работы для очистки участка изготовления резонаторов необходимо включить бокс 1СВ-10-10 (Standa, Латвия). Через 10 мин необходимо проконтролировать количество примесей, используя анализатор размера частиц Handheld 3886 GEO- $\alpha$  (Kanomax, Япония) и метеоскоп. В результате проведенных исследований было установлено, что оператор может приступать к изготовлению резонаторов, если концентрация частиц размерами 0.5 и 1 мкм в окружающей среде не превышает  $4 \cdot 10^5$  и  $8 \cdot 10^4$ , а условия окружающей среды соответствуют ГОСТ Р 8.395-80. В противном случае, необходимо провести влажную уборку и осуществить повторную регулировку параметров окружающей среды в помещении. Затем необходимо выставить напряжение на электролизной установке 6 (рис. 2), соответствующее скорости потока смеси 0.6 л/мин и поджечь к.в.с.

Далее, необходимо очистить сердцевину оптического волокна от полимерной оболочки при помощи стрипера и установить в держатель 7. На следующем этапе поверхность заготовки протирается безворсовой салфеткой, которая предварительно обильно смачивается особо чистым спиртом и одним движением протирается по направлению от ножки, при необходимости операция повторяется несколько раз. Держатель 7 при-



**Рис. 4.** Вид сопел установки для изготовления резонаторов в моменты подведения заготовки (а), предварительной очистки (б) и отведения заготовки (в).

кручивают к микрометрической подаче 3 и поднимают до попадания в одну плоскость с соплами игл (рис. 4а).

После этого необходимо осуществить точную настройку при помощи микрометрической подвижки 1 и поворотных уголков 2 (рис. 2). Это нужно сделать таким образом, чтобы добиться образования области, в которой языки пламени двух сопел пересекаются. Затем волокно поднимают на 100 мкм при помощи микрометрической подачи 3. В этот момент под воздействием высокой температуры происходит дополнительная очистка волокна (рис 4б). Для формирования сферической части резонатора заготовку приподнимают на несколько микрометров (рис. 4в) и после оплавления опускают при помощи подачи 3 (рис. 2), а пламя тушится при помощи компрессора 5 (при давлении в струе 5 бар). Стоит особо отметить, что тушение пламени сжатым воздухом при меньшем давлении может привести к детонации к.в.с. и оплавлению сопел.

После изготовления резонатор устанавливают в специальную герметичную кювету и фиксируют в держатель из вспененного полиэтилена.

Время изготовления одного резонатора составляет ~10 мин.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки воспроизводимости диаметра и углового отклонения нами были изготовлены и изучены две партии микрорезонаторов, по 20 штук каждая. Первую партию изготавливали “вручную”, вторую – автоматизированным методом. Измерения диаметра в экваториальной области и угла наклона проводились с помощью микроскопа Leica DCM 3D (Leica, Германия) при помощи 5-кратного объектива с числовой апертурой 0.15. Также с помощью оптического стенда, подробно описанного в [14], была исследована добротность резонаторов. Среднее значение добротности во второй партии составило  $Q = 10^9$  (с точностью до  $\pm 20\%$ ). Разброс отклонений диаметров резонаторов был порядка 3%. В случае

“ручного” метода изготовления разброс составлял более 80%.

Для измерения углового отклонения использовали два изображения резонатора с поворотом на  $90^\circ$ . На двух снимках при помощи программных средств определяли угол отклонения  $\alpha$  (см. рис. 1). Оказалось, что использование механизированного метода позволяет сократить отклонение с 33.4 до 5.7 мкм.

### ВЫВОДЫ

Разработанная установка позволяет воспроизводимо изготавливать резонаторы из кварца термическим методом. Предложенное решение обеспечивает снижение разброса диаметров резонаторов до 3%, а углового отклонения между плоскостью, касательной к экватору резонатора, и осевой линией ножки в 6 раз относительно “ручного” метода. При этом время изготовления одного резонатора составляет ~10 мин.

Установка выгодно отличается от аналогов простотой конструкции и обслуживания, что в свою очередь заметно снижает себестоимость изготовления резонаторов. Микрорезонаторы, изготовленные термическим методом, могут успешно применяться для детектирования наночастиц или биологических объектов. Автоматизация подачи, а также видеоконтроль положения сопел и заготовки позволили бы улучшить конструкцию установки в дальнейшем.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

При выполнении работы было использовано оборудование Центра коллективного пользования высокоточных измерительных технологий в области фотоники (skr.vniiofi.ru), созданного на базе Всероссийского НИИ оптико-физических измерений и поддержанного Министерством образования и науки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 от 20.11.2019 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S.* // *Phys. Lett. A.* 1989. V. 137. P. 393.  
[https://doi.org/10.1016/0375-9601\(89\)90912-2](https://doi.org/10.1016/0375-9601(89)90912-2)
2. *Pavlov N.G., Lihachev G., Koptyaev S.* // *Appl. Opt.* 2017. V. 42. P. 514.  
<https://doi.org/10.1364/OL.42.000514>
3. *Shitikov A.E., Bilenko I.A., Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Markosyan A., Gorodetsky M.L.* // *Optica.* 2018. V. 5. P. 1525.  
<https://doi.org/10.1364/OPTICA.5.001525>
4. *Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Cherenkov A.V., Voloshin A.S., Pavlov N.G., Koptyaev S., Gorodetsky M.L.* // *Opt. Express.* 2017. V. 25. P. 28167.  
<https://doi.org/10.1364/OE.25.028167>
5. *Pavlov N.G., Kondratyev N.M., Gorodetsky M.L.* // *Appl. Opt.* 2015. V. 54. P. 10460.  
<https://doi.org/10.1364/AO.54.010460>
6. *Min'kov K.N., Ivanov A.D., Samoilenko A.A., Ruzhitskaya D.D., Levin G.G., Efimov A.A.* // *Nanotechnologies in Russia.* 2018. V. 13. № 1–2.  
<https://doi.org/10.1134/S1995078018010093>
7. *Savchenkov A.A., Ilchenko V.S., Matsko A.B., Maleki L.* // *Phys. Rev. A.* 2004. V. 70. P. 4.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.70.051804>
8. *Brasch V., Geiselmann M., Herr T., Lihachev G., Pfeiffer M.H.P., Gorodetsky M.L., Kippenberg T.J.* // *Science.* 2015. V. 351(6271). P. 357.  
<https://doi.org/10.1126/science.aad4811>
9. *Matsko A.B., Savchenkov A.A., Ilchenko V.S., Maleki L.* // *Opt. Commun.* 2004. V. 233. P. 107.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2004.01.035>
10. *Savchenkov A.A., Matsko A.B., Ilchenko V.S., Lute Maleki* // *Opt. Express.* 2007. V. 15. № 11. P. 6768.  
<https://doi.org/10.1364/OE.15.006768>
11. *Городецкий М.Л.* Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: Физматлит, 2011.
12. *Collot L., Lefvère-Seguin V., Brune M., Raimon J.M., Haroche S.* // *Eur. Phys. Lett.* 1993. V. 23 (5). P. 327.  
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/23/5/005>
13. *Самойленко А.А., Левин Г.Г., Лясковский В.Л., Миньков К.Н., Иванов А.Д., Биленко И.А.* // *Оптика и спектроскопия.* 2017. № 6. С. 1037.  
<https://doi.org/10.7868/S0030403417060204>
14. *Ruzhitskaya D.D., Samoilenko A.A., Ivanov A.D., Min'kov K.N.* // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2018. V. 54. № 1. P. 61.  
<https://doi.org/10.3103/S8756699018010107>