ВЕСТНИК ПЕРМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

2026 • ФИЗИКА • Вып. 3

УДК 535.31, 681.7, 53.082.5
PACS 42.81.-i, 81.65.Cf

Формирование линзованных оптических волокон с заданными свойствами: математическое моделирование, эксперимент

А. И. Гордеева†, Л. О. Жуков, Д. И. Нурмухаметов, Д. А. Корнилин, А. С. Паньков, Д. П. Сокольчик, С. С. Толстых, А. А. Журавлев, Ф. Е. Хаснуллин, А. Е. Рогозина, М. Д. Конев, Ф. В. Демин, Р. С. Пономарёв

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
† gordeeva @psu.ru

Объектом исследования являются линзованные оптические волокна, которые применяются при сборке фотонных интегральных схем для ввода и вывода излучения в чипы. Использование таких волокон позволяет решить проблему согласования мод излучения, распространяющегося по одномодовым оптическим волоконным световодам, при вводе его в канальные волноводы, расположенные на чипах фотонных интегральных схем. Подходами к формированию таких волокон в рамках серийного производства относятся методы химического травления и электродугового оплавления. В работе с целью унификации методов было проведено математическое моделирование влияния геометрии образцов на оптические свойства волоконных линз и разработана установка для изготовления линзованных оптических волокон на базе аксиконов, полученных методом химического травления.

Ключевые слова: линзованное оптическое волокно; химическое травление; электродуговое оплавление

Поступила в редакцию 28.04.2026; после рецензии 22.06.2026; принята к опубликованию 22.06.2026

Formation of lensed optical fibers with specified properties: mathematical modeling, an experiment

A. I. Gordeeva†, L. O. Zhukov, D. I. Nurmukhametov, D. A. Kornilin, A. S. Pankov, D. P. Sokolchik, S. S. Tolstykh, A. A. Zhuravlev, F. E. Khasnullin, A. E. Rogozina, M. D. Konev, F. V. Demin, R. S. Ponomarev

Perm State University, Perm, Russia
† gordeeva @psu.ru

The object of the study is lensed optical fibers, which are used in the assembly of photonic integrated circuits for the input and output of radiation into chips. The use of such fibers makes it possible to solve the problem of matching the modes of radiation propagating through single-mode optical fiber light guides when it is introduced into channel waveguides located on photonic integrated circuit chips. Approaches to the formation of such fibers in mass production include methods of chemical etching and electric arc reflow. In order to unify the methods, we mathematically modeled the effect of sample geometry on the optical properties of fiber lenses and developed an installation for manufacturing lensed optical fibers based on axicons obtained by chemical etching.

Keywords: lensed optical fiber; chemical etching; electric arc reflow

Received 28 April 2026; revised 22 June 2026; accepted 22 June 2026

doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-47-65

© Гордеева А. И., Жуков Л. О., Нурмухаметов Д. И., Корнилин Д. А., Паньков А. С., Сокольчик Д. П., Толстых С. С., Журавлев А. А., Хаснуллин Ф. Е., Рогозина А. Е., Конев М. Д., Демин Ф. В., Пономарёв Р. С., 2026

распространяется на условиях лицензии
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

1. Введение

Передача энергии по оптическому волокну (ОВ), обладающего гибкостью и малыми поперечными размерами, характеризуется устойчивостью к внешним воздействиям и имеет низкие потери сигнала. Несмотря на перечисленные плюсы при использовании ОВ возникает фундаментальная проблема взаимодействия его с внешними структурами, которые построены на базе стандартных микроскопических и макроскопических оптических компонентов, таких как линзы, зеркала, детекторы и модуляторы. Этот конфликт вызван волноводной природой света при распространении излучения внутри волокна и его корпускулярной природой в свободном пространстве, что создаёт так называемый «оптический разрыв». Преодоление разрыва и обеспечение эффективного обмена энергией между волокном и внешней средой возможно при использовании специальных переходных элементов, например таких, как волоконные световоды с микролинзами на торце, называемые также линзованными оптическими волокнами (ЛОВ), широко применяющимися в интегральной и волоконной оптике [1–5]. Одним из ключевых элементов, обеспечивающих эффективную передачу, фокусировку и манипуляцию светом на микро- и наноуровне, являются волоконно-оптические микролинзы, уменьшающие диаметр пучка вплоть до 2 мкм [6]. Использование линз позволяет проводить стыковку между оптическим волокном и интегральной схемой через воздушную среду, без контакта с клеем в области распространения света [7–13].

Среди множества типов волоконно-оптических линз особое место занимают конусовидные линзы, которые представляют собой участки оптического волокна, имеющие плавно сужающуюся (коническую) форму и часто завершающиеся остриём с радиусом кривизны от нескольких микрометров до сотен нанометров. Такие структуры обладают уникальными оптическими свойствами: они способны эффективно концентрировать излучение, обеспечивать высокую числовую апертуру, а также могут служить переходным элементом между стандартным оптическим волокном и наноразмерными объектами.

Наиболее распространенным из технологически доступных методов изготовления конусных ЛОВ является метод травления. На сегодняшний день известны такие методы как: метод объёмного травления [14], травление в капле [15, 16], двухэтапное капельное травление [17], травление в защитно-упрочняющем покрытии [18]. Процесс травления протекает в объёме плавиковой кислоты на границе раздела с несмешивающимся с ней верхним реагентом или газовой фазой. Продуктом травления является раствор кремнефтористоводородной кислоты с диоксидом кремния, плотность которого выше плотности исходного реагента [19], что приводит к формированию гравитационной конвекции.

На первом этапе в работе была разработана и аппаратно реализована технология создания конических структур – аксиконов, на торце ОВ методом ускоренного химического травления. Интенсификация процесса осуществлялась благодаря формированию в объёме фтористоводородной кислоты конвективных потоков, возникающих при пропускании через исследуемое волокно инфракрасного излучения [20–22]. Показано, что форма и интенсивность течения в кислотной среде варьируется в зависимости от мощности сил электромагнитной и температурной природы. При оценке величины шероховатости ввиду её высоких значений было показано, что изготовленные ЛОВ указанным способом требуют постобработки. Кроме того, при анализе экспериментальных данных было обнаружено, что методом травления не удаётся получить микролинзы с нужной геометрией, так как угол при вершине конуса имеет значение, при котором точка фокусировки не выходит за пределы кончика оптического волокна. Однако сама форма кончика получается симметричной и такие волокна могут использоваться в качестве заготовок для оплавления и полировки.

Ещё одним из популярных методов изготовления конусных линзованных оптических волокон является метод электродугового оплавления. Такой подход сочетает в себе относительную простоту реализации, высокую воспроизводимость и возможность получения конусов с контролируемыми геометрическими и оптическими параметрами. Суть метода заключается в локальном нагреве участка оптического волокна с помощью электрической дуги, генерируемой между двумя электродами, с последующим одновременным или последовательным растяжением волокна под действием механической нагрузки. В процессе нагрева кварцевое стекло волокна размягчается, и под действием сил поверхностного натяжения и приложенного растягивающего усилия формируется плавный конический профиль.

К преимуществам метода растяжения при оплавлении дугой относят: возможность работать с различными типами оптических волокон – от стандартных одномодовых и многомодовых до специализированных фотонно-кристаллических и полимерных. Получаемые конусы характеризуются высокой механической прочностью и стабильностью формы благодаря тому, что материал сохраняет свою аморфную структуру без введения посторонних примесей или покрытий. При реализации данной технологии необходимо, чтобы температурное поле, создаваемое дугой, было локализовано во избежание чрезмерного размягчения больших участков волокна, но при этом обеспечивало равномерный прогрев по окружности. Профиль конуса зависит не только от параметров растяжения, но и от вязкостно-температурных характеристик стекла,

а также от начальной геометрии волокна (диаметра, наличия покрытия и т.д.).

В работе было принято решение усовершенствовать метод химического травления, а получаемые образцы аксиконов подвергать дополнительной постобработке электрической дугой. С этой целью была разработана установка, позволяющая изготавливать ЛОВ путем оплавления аксиконов, до получения линз с заданными геометрическими параметрами. В дальнейшем после осуществления подбора рабочих режимов данная установка также может быть использована для создания ЛОВ методом электродугового оплавления.

Кроме натурных экспериментов в работе было проведено теоретическое исследование оптических свойств ЛОВ в зависимости от геометрических параметров линзы. Решение теоретической задачи позволяет не только предсказать новые свойства ЛОВ, но и осуществить верификацию с экспериментальными результатами, что особенно важно в инженерных приложениях.

2. Математическое моделирование влияния геометрии образцов на оптические свойства линзованных оптических волокон

2.1. Описание модели изотропного линзованного оптического волокна, изготовленного методом электродугового оплавления

Определение одного из параметров линзованных волокон – фокусного расстояния, требует больших вычислительных затрат. Простые методы геометрической оптики остаются популярными в современных исследованиях [23–25]. Такие методы, при незначительной потере в точности, позволяют вычислить фокусное расстояние значительно проще, быстрее и без специальных пакетов математического моделирования. Однако линзы, формируемые на торцах оптических волокон, не только далеки от того, чтобы быть плоскими, но и имеют сложную геометрическую форму [26–28]. Как правило, их толщина значительно превышает их диаметр, что делает невозможным использование параксиального приближения [26], толщина линзы приводит к аберрациям.

На первом этапе в работе была проведена разработка математической модели линзованного оптического волокна, которая позволяет по заданным геометрическим параметрам линз определять их оптические свойства. В работе исследовано влияние формы образцов, длины и симметрии конуса, а также наличия и толщины слоя оболочки волокна, натекающего на линзу при вытягивании. Проведённые расчёты позволили изучить влияние вариации длины волны на процесс распространения излучения по световому волноводу, оценить величину фокусного расстояния и диаметра поля мод перед непосредственным изготовлением образцов.

Моделирование проводилось в программе Comsol Multiphysics 6.2. Задача основана на решении уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме, с использованием метода конечных элементов в пространственно-частотной области:

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -i\omega\mu H, \\ \nabla \times H &= J + i\omega\varepsilon E, \\ \nabla \cdot D &= \rho, \\ \nabla \cdot B &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где E и H – напряжённости электрического и магнитного полей, D и B – векторы электрической и магнитной индукции, ε – диэлектрическая проницаемость, μ – магнитная проницаемость, ρ – объёмная плотность свободного электрического заряда.

Для двумерной линейной немагнитной среды без дисперсии система уравнений упрощается и принимает следующий вид:

$$\nabla \times (\nabla \times E) - k_0^2 n^2 E = 0, \tag{2}$$

где $k_0^2 = \omega / c_0$ – волновое число свободного пространства.

В двумерной задаче электрическое поле E изменяется в зависимости от внеплоскостной компоненты волнового числа k_z как

$$E(x, y, z) = \tilde{E}(x, y) e^{-ik_z z}. \tag{3}$$

На первом этапе в работе был проведён численный эксперимент для линз с конической оболочкой без изменения геометрии сердцевины в двумерной постановке.

Геометрия системы представлена на рис. 1, где L_0 – это длина конуса (263 мкм), L_1 – длина прямого участка (10 мкм), w_0 – ширина ОВ на входе (125 мкм), w_1 – ширина сердцевины ОВ на входе (8 мкм), w_2 – ширина ОВ на выходе (17.8 мкм), w_3 – ширина сердцевины ОВ на выходе (3 мкм), r – радиус кривизны торца ОВ (13 мкм), dx – толщина слоя наплавления оболочки (0–8 мкм).

Ширина сердцевины ОВ на выходе w_3 определялась по формуле:

$$w_3 = w_1 \frac{w_3}{w_0}. \tag{4}$$

Физические параметры модели имели следующие значения: n_1 – показатель преломления сердцевины (1.446) [1], n_2 – показатель преломления оболочки (1.444) [2], n_3 – показатель преломления воздуха 1, λ – длина волны излучения (1.55 мм), P_{in} – входящая мощность (1 Вт).

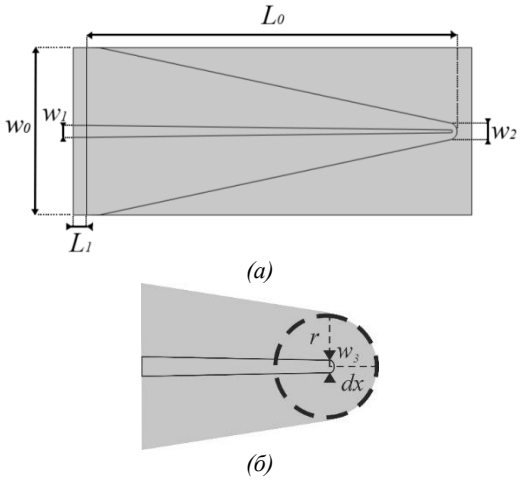


Рис. 1. *Геометрия задачи: (а) – общий план, (б) – торец ОВ*

Конусный участок ЛОВ рассматривался как равномерно сужающееся волокно с торцом в форме полусферы (рис. 1, *б*). В процессе изготовления линз методом электродугового оплавления на этапе утончения ОВ может наблюдаться эффект натекания оболочки на торец сердцевины, при котором материал оболочки, обволакивая сердцевину, образует на её торце слой толщиной *dx*. Показатель преломления данного слоя n_2 отличен от показателя преломления сердцевины n_1. Наличие такого слоя с увеличением значения *dx* может привести к росту потерь при использовании ЛОВ в ФИС.

При математическом моделировании задачи наплавленный слой на границе области счёта задавался толщиной, равной 1 мкм, с условием высокоэффективного искусственного поглощения (Perfectly Matched Layer). Счётная область разделялась на сетку с характерными размерами элементов в диапазоне от 0.1 λ до 0.2 λ. Результатом численного счета являлся массив двумерных полей распределения векторов Умова–Пойтинга $I = \langle S \rangle$.

2.2. Оценка влияния толщины слоя наплавления

Используя выражение $I = \langle S \rangle$, в работе были построены поля распределения интенсивности света от продольной *x* и поперечной *y* координаты пространства. Пример поля распределения вектора Умова–Пойтинга для случая *r* = 25 мкм, *dx* = 5 мкм приведен на рис. 2.

Для определения фокусного расстояния ЛОВ по результатам решения модельной задачи были построены графики зависимости интенсивности от координаты *x* вдоль главной оптической оси. На рис. 3 приведены примеры профилей двух ЛОВ полученных при вариации радиуса кривизны торца ОВ. Для каждой конфигурации ЛОВ определялась координата пика огибающей функции, значение которой соответствует точке максимальной интенсивности, лежащей на главной оптической оси.

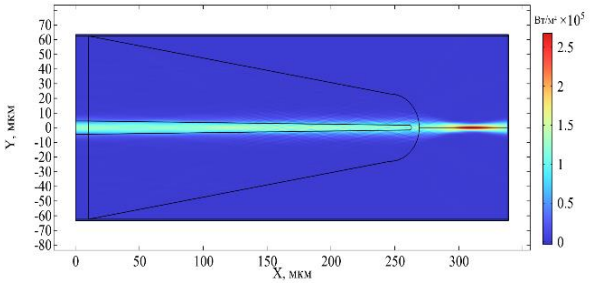


Рис. 2. *Поле распределения интенсивности света: r = 25 мкм, dx = 5 мкм*

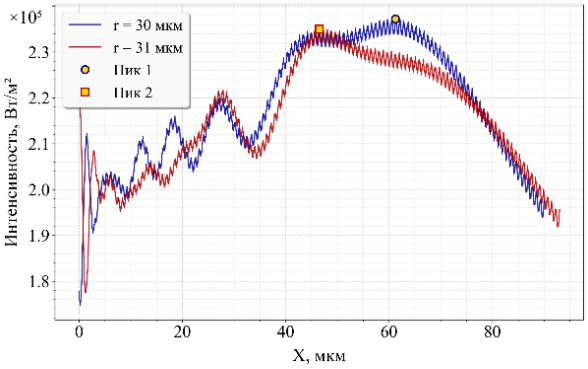


Рис. 3. *Профиль интенсивности лазерного излучения вдоль главной оптической оси*

Из графика видно, что увеличение радиуса кривизны линзы с *r* = 30 мкм на *r* = 31 мкм привело к «обратному» скачку координаты пика огибающей. Такое поведение можно объяснить перераспределением энергии внутри фокусного пятна. Так, в пятне, содержащем несколько интерференционных пиков, образованных из-за сферической аберрации линзы, при увеличении радиуса кривизны более выраженным становится пик низшего порядка, при этом точка координаты максимума огибающей интенсивности перемещается в область меньшего значения *x*. Данный эффект может наблюдаться при увеличении радиуса ОВ неоднократно (рис. 3) и должен учитываться при анализе экспериментальных данных.

Для оценки влияния толщины слоя наплавления оболочки ОВ на оптические свойства ЛОВ в рамках решения численной задачи были проведены расчёты фокусного расстояния от радиуса кривизны линзы при вариации значения *dx* (рис. 4). Из графика, приведённого на рис. 4, видно, что координата максимума функции огибающей интенсивности фокусного пятна растёт прямо пропорционально радиусу кривизны линзы в диапазоне 4 мкм < *r* < 20 мкм. При значениях *r* > 24 мкм в системе наблюдается эффект скачка фокуса, описанного выше. Кроме того, из графика на рис. 4 видно, что толщина слоя наплавления *dx* слабо влияет на смещение координаты пика огибающей, в отличие от вклада изменения *r*.

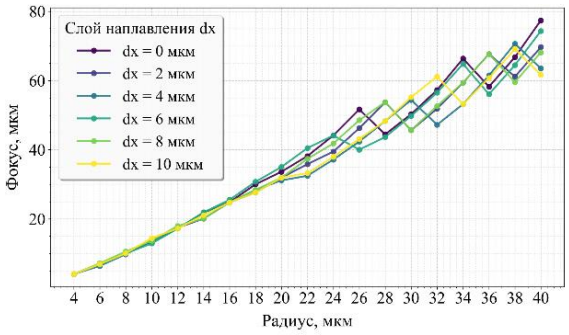


Рис. 4. *Зависимость координаты огибающей функции интенсивности от радиуса кривизны линзы при разных значениях толщины слоя наплавления*

Анализ полученных при расчётах полей распределения интенсивности показал, что при радиусах кривизны больше 25 мкм фокусное пятно становится более вытянутым вдоль оптической оси. В таком случае для характеристики системы имеет смысл ввести дополнительный параметр – длину фокусного пятна, определяемую как длину отрезка огибающей функции, внутри которого интенсивность составляет $1/e$ от максимального значения.

В работе также было проанализировано влияние вариации толщины слоя наплавления на изменение диаметра поля моды (ДПМ) в области фокусного пятна. ДПМ определялся как ширина пика профиля интенсивности на высоте $1/e$ от максимальной величины. На основе полученных данных был построен график зависимости ДПМ от радиуса кривизны линзы при разных значениях толщины слоя наплавления (рис. 5).

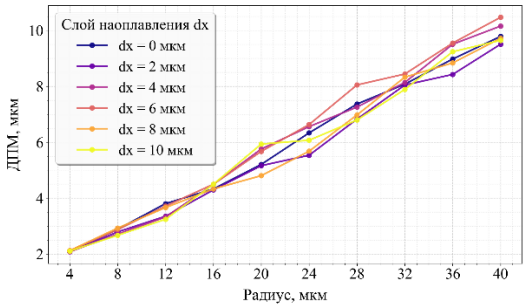


Рис. 5. *Зависимость ДПМ от радиуса кривизны линзы при разных значениях толщины слоя наплавления*

Из графика видно, что толщина слоя наплавления слабо влияет на вариацию ДПМ по сравнению с вкладом изменения радиуса кривизны оптической линзы. Данный эффект возможно связан с относительной малостью величины dx – порядка нескольких длин волн, и близкими значениями показателей преломления оболочки и сердцевины ОВ.

Таким образом, из полученных данных можно сделать вывод о том, что основным параметром, определяющим оптические свойства ЛОВ, является радиус кривизны оптической линзы, в то время как слой наплавления не оказывает существенного влияния на конечные результаты величины фокусного расстояния и ДПМ.

2.3. Оценка влияния длины перетяжки

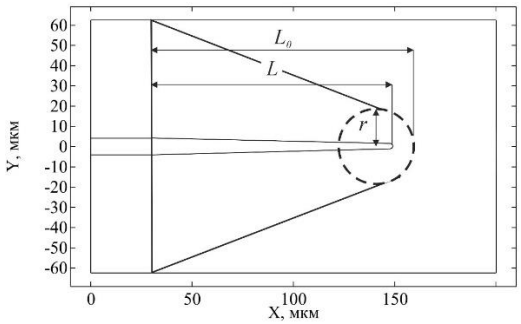


Рис. 6. *Геометрия задачи*

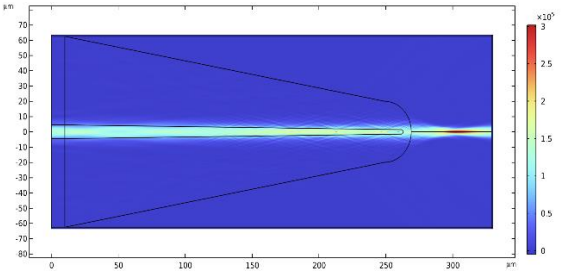


Рис. 7. *Поле распределения интенсивности света: r = 25 мкм, L = 240 мкм*

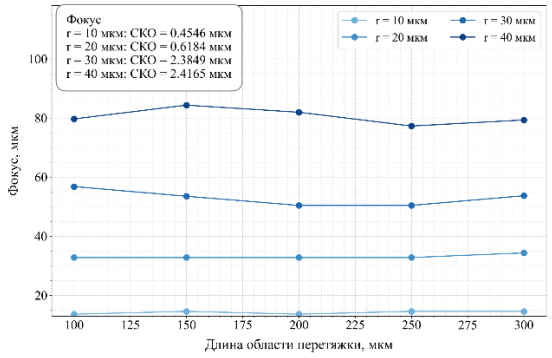
Производство ЛОВ методом электродугового оплавления в процессе изготовления позволяет варьировать ещё один геометрический параметр – длину конуса или длину области перетяжки L. В целях изучения влияния длины сужающейся области на оптические свойства ОВ в работе была проведена серия численных экспериментов с вариацией данного параметра. Длина области перетяжки варьировалась в диапазоне от 100 до 300 мкм, что соответствует значениям L для ЛОВ, получаемых в эксперименте. Радиус кривизны варьировался от 10 до 40 мкм с шагом 10 мкм. Геометрия задачи приведена на рис. 6.

Результатом численного моделирования также являлся массив полей распределения векторов Умова–Пойтинга, один из которых для случая r = 25 мкм, L = 240 мкм в качестве примера приведён на рис. 7.

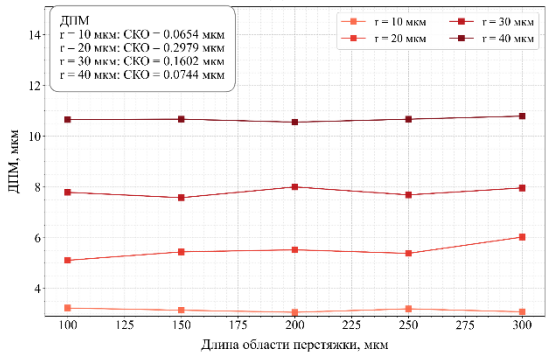
На основе массива полученных данных в работе был построен график зависимости фокусного расстояния (рис. 8, а) и значений ДПМ (рис. 8, б) от длины области перетяжки для линз с различными значениями радиуса кривизны оптической линзы.

В ходе анализа полученных результатов было установлено, что изменение длины участка перетяжки в диапазоне от 100 до 300 мкм не оказывает значительного влияния на положение фокусного пятна и величину ДПМ. Наблюдаемые колебания параметров не превышают 5%. Следовательно, при проектировании ЛОВ с перетяжкой допустимо пре-

небрегать зависимостью характеристик получаемых линз от длины участка сужения. Данное упрощение позволяет сократить вычислительные затраты при оптимизации геометрии волноводных структур без потери точности прогнозирования результатов.



(а)



(б)

Рис. 8. *Зависимость: (а) фокусного расстояния и (б) ДПМ от длины области перетяжки*

2.4. Оценка влияния симметрии конуса

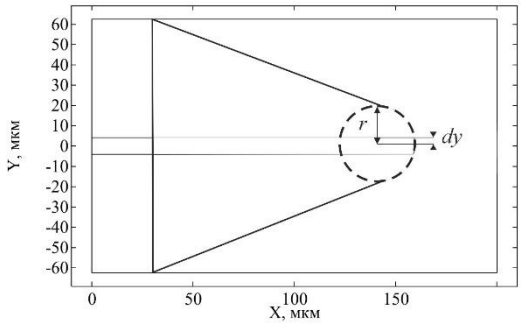


Рис. 9. *Геометрия задачи*

Предварительное исследование изготовленных образцов ЛОВ показало, что в результате плавления материала волокна может произойти деформация линзы со смещением её вершины и, как следствие, к нарушению симметрии формы конуса относительно главной оптической оси. Данный эффект также может повлиять на оптические свойства ЛОВ, поэтому при выполнении НИР была проведена оценка влияния смещения центра вращения линзы относительно главной оптической оси. В рамках решения численного эксперимента рассматривалась линза с конической оболочкой без изменения геометрии сердцевины в двумерном пространстве со смещением кончика линзы *dy* от 0 до 6 мкм с шагом 1. Радиус кривизны торца ОВ составлял 10 мкм. Геометрия задачи приведены на рис. 9.

В модели исследовались конфигурации с одним радиусом кривизны линзы r равным 10 мкм, также не учитывались вариации слоя наплавления и сужения сердцевины ввиду их слабого влияния на изменение оптических свойств ЛОВ.

Пространственный шаг сетки $\Delta x = \Delta y$ находился в диапазоне от $\lambda/8$ до $\lambda/6$. Показатель преломления оболочки = 1.44, показатель преломления сердцевины = 1.46, длина волны = 1.55 мкм, сдвиг по высоте варьировался от 0 до 6 микрометров с шагом 1 микрометр. В результате численного моделирования были получены поля интенсивности излучения, пример которого для случая линзы с r = 10 мкм, L = 120 мкм и dy = 6 мкм приведен на рис. 10.

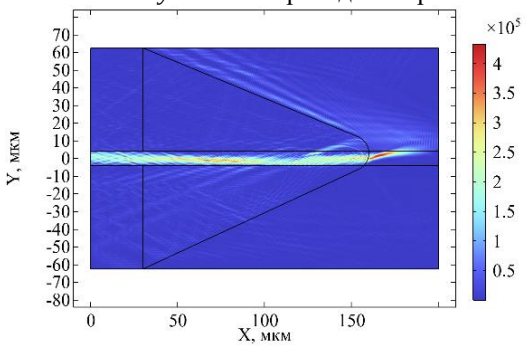


Рис. 10. *Поле распределения интенсивности света: r = 10 мкм, L = 120 мкм, dy = 6 мкм*

На основе матрицы данных в работе был построен график смещения координаты фокуса от вариации положения центра вращения линзы относительно главной оптической оси (рис. 11). Анализ результатов показал, что нарушение симметрии вершины конуса относительно главной оптической оси волновода приводит к сдвигу фокусного пятна на мнимую оптическую ось. Значения координаты центра вдоль осей X и Y при этом нелинейно меняются с ростом *dy*, а само фокусное пятно смещается всё дальше от оптической оси в ортогональном к ней направлении. На первый взгляд явление носит отрицательный характер, однако на практике может способствовать упрощению стыковки ЛОВ с волноводом, так как точка фокуса вытягивается к мнимой оптической оси при смещении вершины, уменьшая распределение интенсивности вдоль оси Y. Негативную роль данный эффект может сыграть в случае работы с многоканальными стыковочными блоками с V-канавками или при работе с ферулами, поскольку в таких системах позиционирование ЛОВ осуществляется не по положению фокусного пятна, а по геометрическим параметрам комплектующих. Несогласованность оптических и геометрических характеристик модулей может привести к многократному росту потерь.

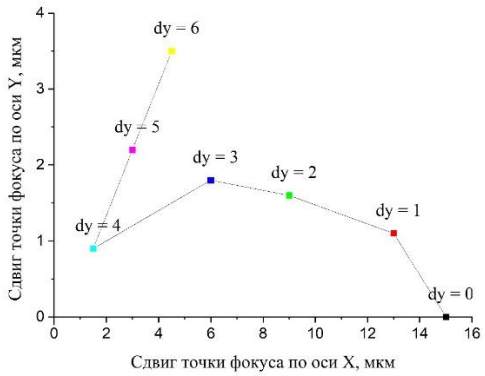


Рис. 11. *Зависимость координаты фокусного пятна от вертикального сдвига центра вращения линзы dy*

2.5. Результаты моделирования работы ЛОВ в УФ-диапазоне

Одной из областей использования линзованных волокон является работа с объектами в сфере биофотоники, в которой активностью отдельных клеток или нейронов управляют с помощью направленного на них света. Данная работа требует высокоточной доставки оптического излучения к объектам исследования. Одной из ключевых целей при этом является минимизация воздействия на окружающие ткани и обеспечение локализованной засветки с высокой пространственной точностью. Для решения данной задачи отлично подходят ЛОВ, однако при работе с фоточувствительными нейронами и другими типами фоточувствительных клеток возникает необходимость использования УФ-излучения. Для анализа работы ЛОВ на длине волны 350 нм был проведён численный эксперимент для линз с конической оболочкой без наплавления $dx = 0$ мкм и изменения геометрии сердцевины $dy = 0$ мкм в двумерной постановке. Геометрия задачи приведена на рис. 12.

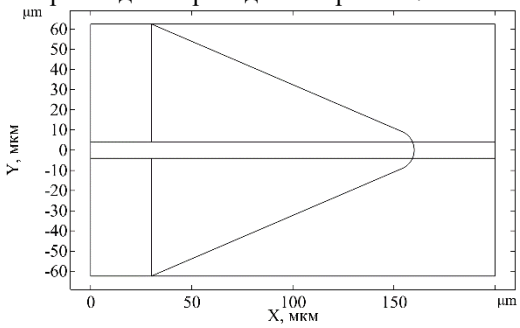


Рис. 12. *Геометрия задачи*

Пространственный шаг сетки $\Delta x = \Delta y$ находился в диапазоне от $\lambda/9$ до $\lambda/6$. Показатель преломления оболочки = 1.44, показатель преломления сердцевины = 1.46, длина волны = 0.35 мкм, радиус варьировался от 10 мкм до 60 мкм с шагом 10 мкм.

Поле распределения интенсивности излучения для случая линзы с $r = 10$ мкм, $L = 120$ мкм приведено на рис. 13.

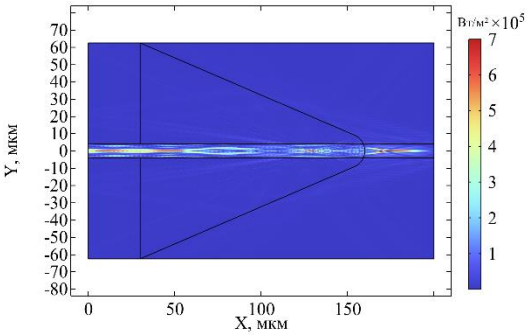
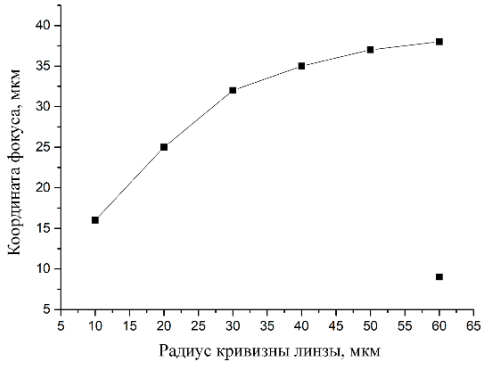
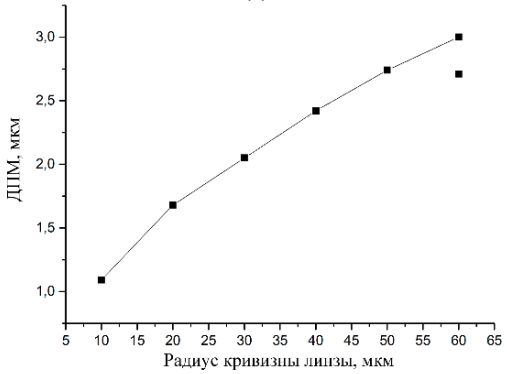


Рис. 13. *Поле распределения интенсивности света: r = 10 мкм, L = 120 мкм*

В результате исследования было обнаружено, что при значениях радиуса кривизны линзы больше 60 мкм излучение с длиной волны в 0.35 мкм 350 нм распространяется по волноводу в многомодовом режиме. Наличие межмодовой дисперсии приводит к формированию второго фокусного пятна с меньшим значением ДПМ, расположенного ближе к поверхности линзы.



(а)



(б)

Рис. 14. *Зависимость: (а) фокусного расстояния и (б) ДПМ от радиуса кривизны линзы: L = 120 мкм, λ = 350 нм*

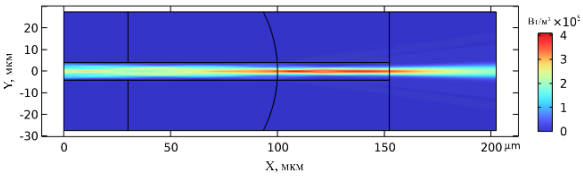


Рис. 15. *Профиль интенсивности волокна с радиусом r = 60 мкм*

Зависимость координаты фокусного пятна от радиуса кривизны ЛОВ и значения ДПМ приведены на рис. 14, *а* и 14, *б* соответственно.

Профиль распределения интенсивности для случая двойного фокуса (r = 60 мкм) представлен на рис. 15.

3. Изготовление волоконно-оптических линз методом ускоренного химического травления под воздействием ИК-излучения с последующим оплавлением

Как было отмечено выше, в рамках разработки технологии изготовления ЛОВ было принято решение усовершенствовать метод химического травления. Одним из возможных вариантов модификации может являться проведение технологического цикла с нагревом сред. Кроме того, скоростью диффузии в жидкости можно управлять, пропуская оптическое излучение через исследуемое ОВ. Проведённые ранее эксперименты показали, что при общем нагреве системы падает повторяемость результатов и увеличивается количество брака. Ввод излучения с длиной волны 1550 нм, мощностью 10 мВт в ОВ в процессе травления позволяет ускорить процесс травления до 70–10 минут против 2 часов ранее и минимизировать влияние опускных потоков реагента. Предварительно проведенные исследования показали, что одним из необходимых условий получения аксиконов правильной формы является постоянство температуры используемых жидкостей. Поддержание температуры во время технологического цикла позволяет избежать формирования термогравитационных течений, влияющих на геометрические параметры образцов. Для регулирования температуры травителя, буферного слоя и термостатирования системы в работе была собрана установка, схема которой приведена на рис. 16.

Нагревательный/охлаждающий элемент *7*, предназначенный для управления температурой, с водяным теплообменником *8* устанавливается в массивный металлический буфер *9* с высокой теплопроводностью. Для теплоизоляции от внешней среды вся конструкция помещалась в пластиковый корпус *10*, который был изготовлен на FDM 3D-принтере из PETG. Процент заполнения детали *10* составляет 15%, шаблон заполнения – треугольники, толщина стенок 1.6 мм, общая толщина корпуса – 6 мм. Процесс травления осуществлялся на одномодовом оптическом волокне SMF-28. Модификация метода позволила получить образцы ЛОВ с высокой повторяемостью геометрических форм, которые на следующем этапе проходили процесс оплавления.

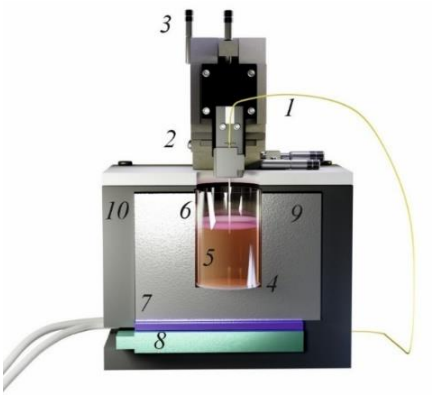
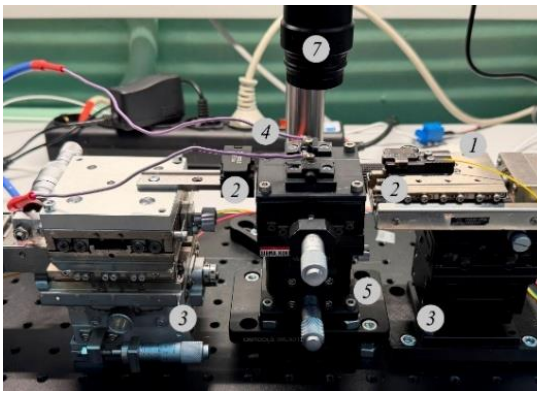
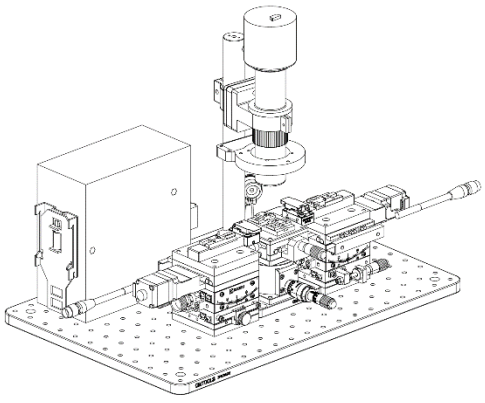


Рис. 16. *Схема термостатирующего контура: 1 – оптическое волокно, 2 – держатель ОВ, 3 – одноосный позиционер, 4 – полипропиленовая ёмкость, 5 – плавиковая кислота, 6 – буферный слой, 7 – нагревательный элемент, 8 – водяное охлаждение, 9 – металлический буфер, 10 – изолирующий корпус установки*

3.1. Оплавление аксиконов, полученных методом химического травления. Механическая часть. Управление движением



а



б

Рис. 17. *Внешний вид установки: а) фото, б) схема, 1 – оптическое волокно, 2 – моторизованный позиционер, 3 – держатель для оптических волокон, 4 – электроды, 5 – юстировочный столик с электродами, 6 – оптическая плита, 7 – видеокамера*

Изготовление ЛОВ путём дополнительного электродугового оплавления аксиконов осуществлялось на установке, фото и механическая схема которой приведены на рис. 17. Для юстировки предварительно очищенное после этапа химического травления, волокно *1* закреплялось в держателе *2*, расположенном на моторизованном микропозиционере *3*. Коническая часть аксикона располагалась в зоне действия электрической дуги, которая формировалась между двумя электродами *4*, закрепленными на заданном расстоянии друг от друга на юстировочном столике *5*. Все структурные элементы фиксировались на плоскости оптической плиты *6*. Для визуального контроля технологического цикла в работе использовалась система оптического зрения *7*. Поскольку в перспективе данное оборудование может быть использовано для производства ЛОВ методом электродугового оплавления, уже на первом конструкторском этапе установка снабжалась двумя парами моторизованных микропозиционеров с держателями ОВ.

В работе была реализована система управления позиционерами, которая по введённому оператором режиму способна выполнять смещение держателей ОВ на заданное расстояние с параллельным включением и выключением электрической дуги.

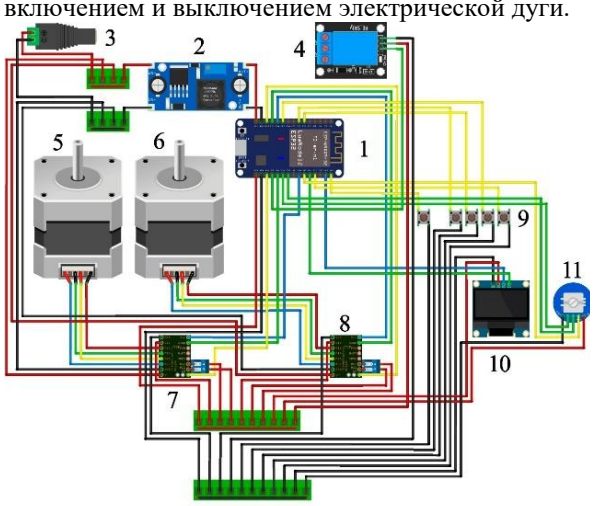


Рис. 18. *Электрическая схема управления установкой: 1 – микроконтроллер ESP32, 2 – понижающий преобразователь напряжения, 3 – разъём питания, 4 – модуль электромагнитного реле, 5, 6 – шаговый двигатель, 7, 8 – драйвер шагового двигателя, 9 – набор кнопок, 10 – OLED дисплей, 11 – модуль энкодера*

В ходе технологического процесса движение позиционерами регулировалось контроллером, управление которого осуществляется с помощью кнопок, расположенных на передней панели прибора. Использование контроллера позволяет смещать платформу микропозиционера в диапазоне от 0 до 20 мкм с точностью до 12.5 нм с заданной скоростью. Управление параметрами электрической дуги осуществлялось отдельно. Электрическая схема управления приведена на рис. 18. На схеме цифрой *1* обозначен микроконтроллер ESP32, *2* – понижающий преобразователь напряжения для питания микроконтроллера от блока питания (DC-DC преобразователь LM2596S с цифровым дисплеем, Uвх = 4–40 В, Uвых. = 1.25–37 В, 3А), *3* – разъём питания типа розетка (DC 5.5x2.1), *4* – модуль одноканального переключающего электромагнитного реле, *5*, *6* – шаговый двигатель типа NEMA 11 микропозиционера № 1 и № 2 соответственно (Hanpose 11HS3401 (28×34 мм)), *7*, *8* – драйвер шагового двигателя микропозиционера № 1 и № 2 соответственно (TMC2209 V1.3, BigTreeTech), *9* – набор кнопок для управления перемещением шаговых двигателей микропозиционеров и смены режима работы устройства, *10* – OLED дисплей для вывода информации о текущем режиме (OLED дисплей 0.96" 128x64, I2C), *11* – модуль энкодера на плате (EC11).

3.2. Электрическая схема. Управление дугой

В разработанной автоматизированной установке генерация электрической дуги, подача импульсов на электроды и управление их выходными параметрами осуществлялось с помощью плат, схемы которых приведены на рис. 19 и 20 соответственно.

Принципиальная схема фрагмента генератора высоких напряжений, формирующего электрическую дугу, приведена на рис. 19. Данная часть представляет собой силовую часть установки, которая предназначена для накопления энергии в конденсаторах от понижающего трансформатора и подачи её в цепь. Подача высокого напряжения на электроды приводит к инициации плазмы. Кроме того, использование данной платы позволяет снизить влияние скачков напряжения на элементы силовой цепи и защитить их от перенапряжения.

В ходе технологического цикла энергия со вторичной обмотки трансформатора поступает на выпрямительный узел, где переменное напряжение преобразуется в постоянное. Далее постоянное напряжение сглаживается и стабилизируется накопительными конденсаторами, которые служат резервуаром энергии для импульса разряда. После накопления энергии подача её на электроды осуществляется только по управляющему сигналу со второй платы (рис. 20). Когда с платы управления поступает команда на срабатывание, сигнал проходит через каскад усиления на транзисторах: сначала формируется и усиливается управляющий ток, затем включается силовой транзисторный ключ. Одновременно с этим реле выполняет коммутацию силовых цепей, обеспечивая включение нужного участка силового тракта в заданный момент.

В цепи, формирующей дуговой разряд, присутствуют элементы, которые ограничивают резкое изменение тока и уменьшают амплитуду выбросов напряжения при коммутации. Это необходимо для устойчивого формирования импульса разряда и для защиты силовых транзисторов, диодов и контактов

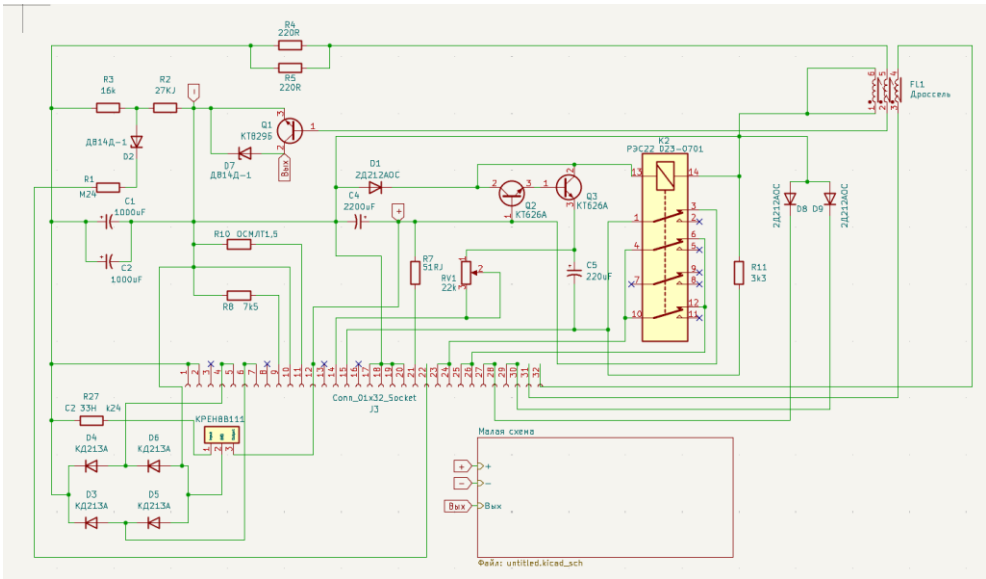


Рис. 19. *Принципиальная схема фрагмента генератора высоких напряжений*

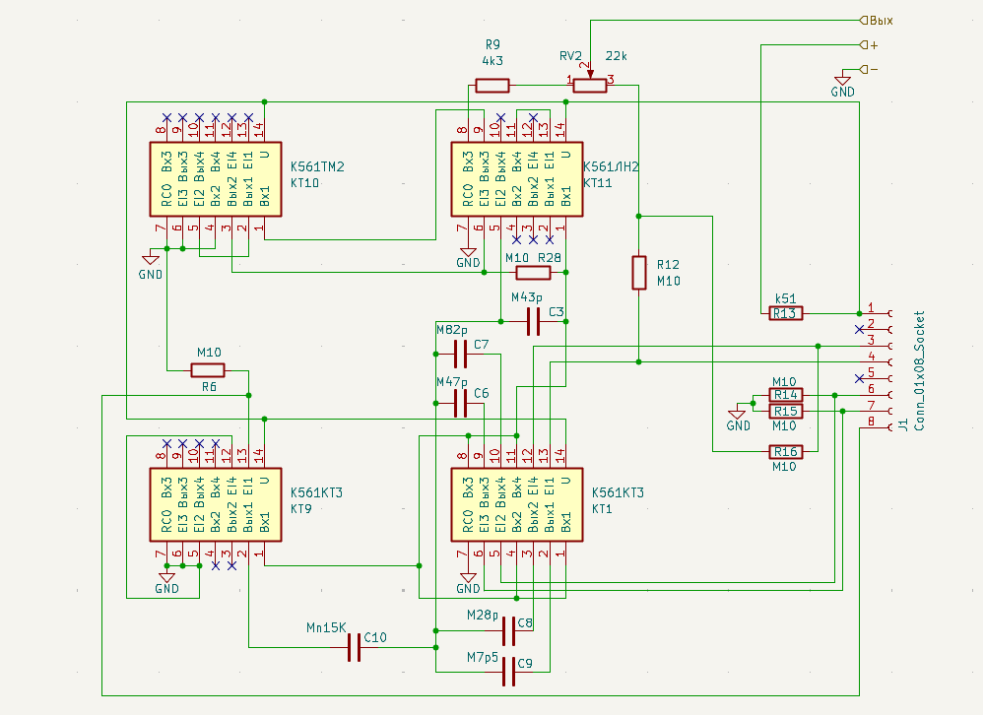


Рис. 20. *Принципиальная схема фрагмента генератора высоких напряжений*

реле от перенапряжения. В результате на выходе платы формируется управляемый импульс, который далее проходит через внешние элементы установки и подаётся на электроды для генерации плазмы.

Таким образом плата, формирующая дуговой разряд, выполняет следующие функции:

– преобразование переменного напряжения со вторичной обмотки трансформатора в постоянное напряжение для питания силового тракта;

– накопление энергии в конденсаторах для формирования разрядного импульса;

– включение и отключение силовой цепи разряда по команде от платы управления разрядом;

– согласование управляющих сигналов с силовой частью через транзисторные каскады;

– повышение устойчивости работы разряда и защита силовых элементов от выбросов напряжения и резких скачков тока.

Аналогичным образом была разработана и изготовлена плата, предназначенная для формирования управляющих импульсов, которые задают режим работы разряда: момент включения, длительность, повторяемость и последовательность управляющих воздействий (рис. 20).

В процессе подачи питания плата управления формирует опорные сигналы синхронизации, кото-

рые задаются элементами цепи для регулировки частоты и длительности. На логических микросхемах формируются прямоугольные единичные импульсы или их последовательность. Одни элементы платы отвечают за генерацию и формирование фронтов сигналов, другие – за запоминание состояния и создание нужной структуры импульса, третьи – за переключение режимов и коммутацию внутренних цепей формирования.

При изменении настройки на элементах управления изменяются параметры временных цепей, вследствие чего меняется частота повторения или длительность управляющих импульсов. Когда формируется команда на запуск разряда, плата выдаёт на выходные линии управляющий сигнал, который поступает на силовую плату. Силовая плата, получив этот сигнал, включает силовой ключ и коммутирует силовой тракт, формируя разрядный импульс. Таким образом, плата управления разрядом задаёт «когда и как долго» должен происходить разряд, а плата формирования импульса разряда обеспечивает «какой энергией и через какую силовую цепь» этот разряд реализуется.

Таким образом плата для управления разрядом отвечает за следующие функции:

– формирование временных параметров работы разряда (длительность импульса, паузы, повторяемость);

– переключение режимов работы разряда посредством логических узлов и ключевых элементов;

– выдача согласованных управляющих сигналов на плату формирования импульса разряда;

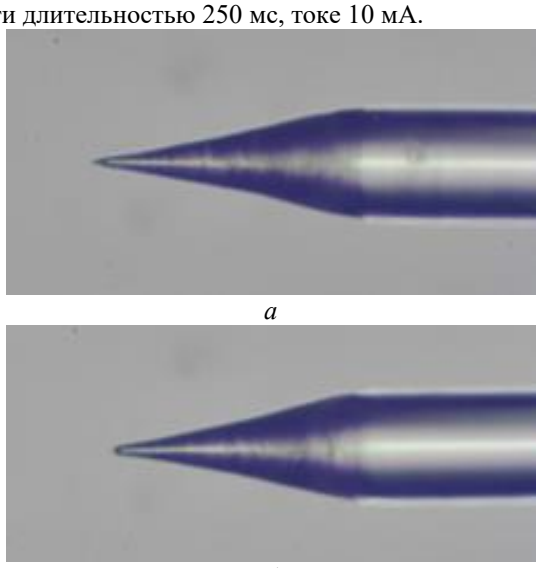
– обеспечение устойчивого запуска и корректной последовательности управляющих сигналов.

По команде оператора (включение режима, запуск, установка параметров) низковольтное питание со вторичной части трансформатора подаётся на плату управления через разъём, задавая требуемый режим генерации управляющих импульсов. Последняя выдаёт сигналы на управляющие линии, которые обозначены как «минус», «плюс» и «выход». Эти линии определяют разрешение разряда, временные параметры и момент включения силового тракта.

Одним из вариантов применения разработанной сварочной установки в дальнейшем является использование её для изготовления ЛОВ методом электродугового оплавления, в процессе которого образуется область истончения ОВ – перетяжка. При такой работе устройства необходима высокая согласованность начала движения микропозиционеров с моментом инициации электрической дуги. Для решения данной задачи в конструкцию аппарата было встроено реле, сопряжённое с кнопкой «Пуск», которое, замыкая и размыкая цепь, осуществляло запуск электрической дуги параллельно с движением позиционеров. Программный интерфейс позволяет указать время задержки для прецизионной настройки устройства для получения образцов ЛОВ с заданными характеристиками.

Для сравнения на рис. 21 приведено фото формы аксикона, полученного методом химического травления, до (рис. 21, *а*) и после (рис. 21, *б*) оплавления на разработанном ручном сварочном аппарате.

Из рисунка 21, *а* видно, что изготавливаемые аксиконы имеют правильную форму конуса. Угол раствора конуса мал, а значит фокус линзы будет расположен внутри ОВ. С целью смягчения профиля конуса, полученного методом химического травления, аксиконы проходили процедуру дополнительного оплавления на разработанном сварочном аппарате. Для этого закреплённое в держателе при помощи позиционеров волокно с заготовкой подводят к электродам так, чтобы вершина конуса располагалась на расстоянии 2 мм от инициируемой аппаратом электрической дуги. Процесс оплавления проводился под действием электрической дуги длительностью 250 мс, токе 10 мА.



а

б

Рис. 21. *Фото ЛОВ, полученного методом химического травления: а) до и б) после оплавления*

После изготовления у исследуемых образцов измерялись фокусное расстояние, ДПМ, определялись значения оптических потерь и величина шероховатости.

4. Результаты измерения оптических свойств ЛОВ и их анализ

4.1 Фокусное расстояние, ДПМ

На первом этапе в работе были определены фокусное расстояние и ДПМ полученных ЛОВ после дополнительного оплавления аксиконов.

Методика измерения фокусного расстояния ЛОВ основывается на принципе работы интерферометра Фабри–Перо. Для реализации метода ЛОВ необходимо разместить перпендикулярно зеркалу, закреплённому на трехосевом микропозиционере не допуская изгиба волокна радиусом менее 30 мм, и подключить волокно согласно оптической схеме, приведённой на рис. 22.

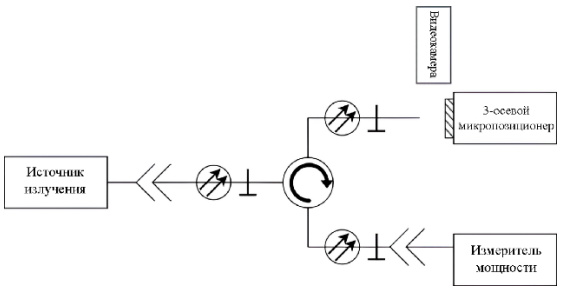


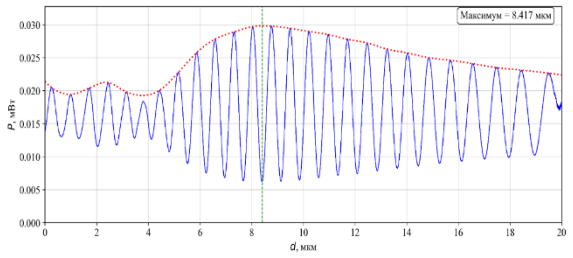
Рис. 22. *Оптическая схема измерения фокусного расстояния*

После включения источника излучения необходимо зафиксировать мощность оптического излучения P в дБм по показаниям измерителя оптической мощности. Затем подвести зеркало вплотную к ЛОВ и начать постепенное отведение от ЛОВ при помощи контроллера моторизованного микропозиционера с шагом в 1 мкм, фиксируя при каждом шаге значение оптической мощности P в дБм. При помощи программного обеспечения на основе полученных данных строится график зависимости мощности оптического излучения от расстояния между ЛОВ и зеркалом, и определяется значение координаты, соответствующей максимальной мощности сигнала. Оно и отмечается как фокусное расстояние исследуемого волокна.

Пример фото ЛОВ и его изображения приведены на рис. 23, *а*, пример графика зависимости $P(x)$ представлен на рис. 23, *б*.



а



б

Рис. 23. *а) Фото ЛОВ, подведённого к зеркальной поверхности, б) пример интерференционного сигнала при измерении фокусного расстояния*

В работе благодаря разработанному программному обеспечению процесс измерения мощности, визуализация и анализ данных проходили в автоматическом режиме.

Для реализации метода измерения ДПМ линзованное оптическое волокно необходимо разместить в держателе напротив эталонного линзованного оптического волокна, выступающего в роли зонда согласно схеме, приведённой на рис. 24.

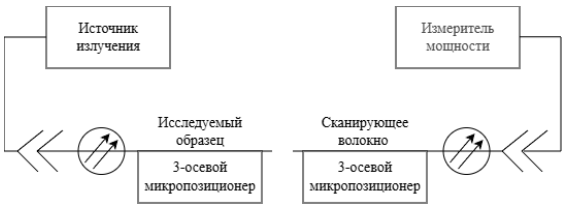


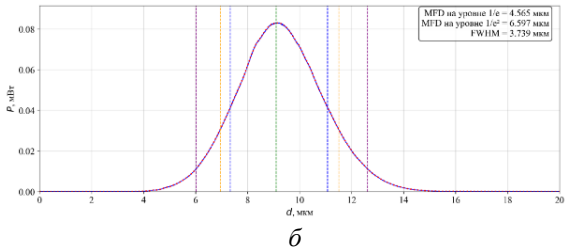
Рис. 24. *Оптическая схема измерения ДПМ*

С помощью трёхосного микропозиционера и измерителя оптической мощности линзованное и зондирующее оптические волокна подводятся друг к другу торец в торец (рис. 25, *а*) и осуществляется юстировку положения оптических волокон по достижению максимально возможного уровня проходящего оптического сигнала P. Далее зондирующее волокно отводится в сторону на 10 мкм, и проводится измерение мощности проходящего сигнала. На следующем этапе положение зондирующего волокна смещается в плоскости, ортогональной зонду, с шагом 0.01 мкм в сторону максимального значения мощности, с фиксацией при каждом шаге мощности P в дБм. Процесс повторяется до тех пор, пока суммарное пройденное расстояние не будет равно 20 мкм.

На основе полученных данных были построены графики приведенной зависимости мощности оптического излучения от расстояния d. На уровне $1/e^2$ от максимального значения мощности определена ширина распределения, которое является диаметром поля моды. На высоте 1/2 от максимального значения P определена величина FWHM (рис. 25, *б*). В работе благодаря разработанному программному обеспечению процесс измерения ДПМ и FWHM, визуализация и анализ данных проходили в автоматическом режиме.



а



б

Рис. 25. *а) Фото ЛОВ и зондирующего волокна, б) пример распределения приведённой интенсивности излучения при определении диаметра поля моды*

Анализ результатов показал, что линзы, изготовленные комбинированным методом травления с дополнительным оплавлением характеризуются значением фокусного расстояния 4.37±2.39 мкм и ДПМ 3.32±0.23 мкм. Таким образом можно сделать

вывод о том, что режимы дополнительного оплавления играют определяющую роль в изготовлении линз с использованием сварочного аппарата.

4.2. Оптические потери

Оптические потери – это уменьшение мощности светового сигнала при его распространении по оптическому волокну или прохождении через оптические элементы, такие как волоконные линзы. Потери измеряются в децибелах (дБ) и рассчитываются по формуле:

$$\alpha = -10\lg\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right), \qquad (5)$$

где P_{in} – входная мощность, P_{out} – выходная.

При качественном исполнении потери на линзованных оптических волокнах обычно составляют 0.1–0.5 дБ. Величина потерь особенно критична при соединении ЛОВ с другими компонентами (лазерами, детекторами), где важна точная пространственная фильтрация моды. Таким образом, общие потери волоконно-оптической системы складываются из затухания в волокне, вносимых потерь соединителей, сварных точек и функциональных элементов, включая линзы.

Определение потерь оптического сигнала в работе происходило посредством измерения мощности проходящего сигнала через систему «линза»–«волокно типа UHNA». Использование одномодовых оптических волокон с высокой числовой апертурой типа UHNA7, во-первых, позволяет более эффективно осуществлять ввод излучения от ЛОВ, имеющих малый диаметр модового поля, а, во-вторых, даёт возможность потребителю применять единичные образцы линз независимо от конечной конструкции ФИС. Создание зондирующего волокна осуществлялось путем сваривания волокна SMF-28 с одномодовым волокном с высокой числовой апертурой. Заключительным этапом в изготовлении структуры является формирование прямого скола на торце отрезка волокна UHNA с помощью скалывателя. Такой способ позволяет получить одномодовое волокно с небольшим отрезком волокна UHNA на торце длиной от 3–15 мм.

Для измерения оптических потерь исследуемое ЛОВ необходимо поместить на платформу микропозиционера. При этом не допускается изгиб оптического волокна с радиусом менее 30 мм. Аналогичным образом установить напротив волокно типа UHNA. Оптические коннекторы линзованного и приёмного оптических волокон, предварительно очистив от пыли, подключить к источнику излучения и измерителю мощности (рис. 24). С помощью трёхосного микропозиционера и измерителя оптической мощности подвести оптические волокна друг к другу торец в торец. Провести юстировку положения волокон до получения максимального сигнала, проходящего через исследуемую систему. Записать значение потерь в системе.

В результате измерений было выявлено, что наименьшие потери были зафиксированы при стыковке системы двух линз, выполненных методом электродугового оплавления с формированием перетяжки на режиме работы сварочного аппарата № 1. Минимальный разброс по данным демонстрируют пары выполненные на режиме 2. Среднее значение потерь при измерении их с использованием волокна типа UHNA составило α = 4.6±1.6 дБ.

4.3. Шероховатость конусной поверхности

Одним из параметров, описывающим качество линз или их предшественников – аксиконов, является шероховатость поверхности, от которой зависит степень рассеяния вводимого и выводимого излучения. Рост шероховатости приводит к нарушению пространственной когерентности, а также к увеличению оптических потерь в системе [29–31].

Измерение шероховатости конуса ЛОВ проводится на установке OLYMPUS FV3000 на базе микроскопа Olympus IX83 методом лазерной конфокальной микроскопии. После оптического сканирования в программном пакете рассчитывается значение параметра *Ra* шероховатости, как арифметическое среднее абсолютного отклонения профиля поверхности вдоль выделенной прямой, проведенной на оси симметрии конуса (ISO 4287:1997, ГОСТ Р ИСО 4287-2014).

При измерении образец фиксируется в горизонтальной плоскости и устанавливается в поле зрения профилометра. Для сравнения и расчёта среднего значения шероховатость определяется в трёх участках на заданной прямой. На рисунке 26 приведены фото образца, 3D профиль конуса, восстановленные в программном пакете оптического профилометр, и график профиля поверхности с указанием областей определения параметра *Ra*.

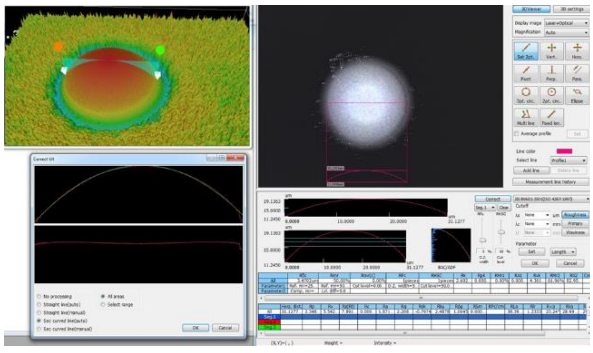


Рис. 26. *Пример измерения шероховатости*

Поскольку при горизонтальной фиксации образца поверхность исследуемой части конуса располагается под некоторым углом относительно датчика профилометра, то для компенсации ориентации перед расчётом *Ra* производится автоматическая коррекции его наклона. Каждый из исследуемых образцов ЛОВ измерялся с торца. При

этом волокно находится под небольшим произвольным углом, обусловленным наклоном подставки и свисанием волокна под действием силы тяжести.

По результатам измерения выявлено, что значение *Ra* поверхности аксиконов после травления составила 821.5±0.5 нм, а после оплавления варьируется от 90 до 130 нм.

Используя критерий Рэлея, проведём оценку поверхности шероховатости ЛОВ:

$$\sigma < \lambda / 8, \quad (6)$$

где $\sigma = 1.25Ra$ – это среднеквадратичное значение шероховатости, найденное в приближении случайных поверхностей.

Поверхность считается оптически гладкой в случае выполнения неравенства (6). Используя значение рабочей длины волны 1550 нм, получаем, что отношение λ/8 равно 193.75 нм, тогда как максимальное значение для ЛОВ, прошедших процедуру дополнительного оплавления *σ*, равно 162.5 нм, что меньше указанного λ/8, а значит условие (6) выполняется. Из проведённых исследований следует, что поверхность конуса ЛОВ после дополнительного оплавления можно считать оптически гладкой, а ОВ – пригодными для использования в телекоммуникации.

5. Выводы

В работе проведено численное моделирование излучения, распространяющегося по линзованному оптическому волокну, изготовленному методом электродугового оплавления, которое было проведено в программе COMSOL Multiphysics 6.2. Установлена зависимость оптических свойств ЛОВ от конструктивных особенностей линзы и длины волны используемого излучения. Результаты, полученные на основе решения системы уравнений Максвелла методом конечных элементов, демонстрируют следующие ключевые закономерности:

– фокусное расстояние линзы в диапазоне *r* до 25 мкм линейно растёт с радиусом кривизны торца ОВ при вариации значений толщины наплавления оболочки на сердцевину *dx*. При радиусах свыше 25 мкм наблюдается нелинейный скачок координаты фокусного пятна, вызванный наличием в системе сферической аберрации. Интерференция излучения внутри пятна приводит к перераспределению энергии, при которой доминирующий пик функции огибающей интенсивности смещается в область с меньшим значением координаты *X*. Такие скачки требуют учёта при проектировании линз в высокоточных приложениях, где стабильность положения фокуса имеет фундаментальное значение;

– толщина слоя наплавления оболочки *dx* в пределах от 0 до 8 мкм оказывает слабое влияние как на фокусное расстояние, так и на диаметр поля моды, что объясняется короткой длиной области взаимодействия луча с данной областью ОВ (порядка нескольких длин волн) и малой разностью показателей преломления сердцевины и оболочки;

– смещение вершины конуса линзы относительно оси вращения приводит к нелинейному сдвигу фокусного пятна относительно главной оптической оси. В случае одноканальных ФИС данный эффект может упростить юстировку ЛОВ с волноводами, однако в многоканальных устройствах требует обязательного учёта, так как нарушает геометрическую согласованность элементов системы. Анализ данных подчеркивает необходимость точной центровки вершины линзы при массовом производстве образцов;

– моделирование распространения по ОВ излучения с длиной волны 350 нм выявило переход к многомодовому режиму волновода, что при радиусе кривизны линзы свыше 60 мкм приводит к формированию пятна с двумя перетяжками. Данный эффект ограничивает применение ЛОВ в биофотонике, например, для стимуляции нейронов, где требуется одномодовый режим работы волокна и высокая пространственная точность распределения светового пучка. Для корректной работы в УФ-диапазоне излучения необходимо снижать радиус кривизны линзы и оптимизировать геометрию сердцевины. Результаты моделирования подтверждают, что основными параметрами, определяющими качество ЛОВ, являются радиус кривизны торца и симметрия формы. Слой наплавления и асимметричные отклонения геометрии конуса играют второстепенную роль, но требуют учёта в специфических сценариях применения. Полученные зависимости позволяют прогнозировать поведение линз в различных условиях, что критично для их внедрения в телекоммуникации, микроскопию и биофотонику.

Разработанная модель служит основой для целенаправленной оптимизации геометрии линз, минимизации аберраций и адаптации ЛОВ под специфические задачи, включая работу в УФ-диапазоне. Дальнейшие исследования должны быть направлены на верификацию результатов экспериментальными данными и расширение модели на трёхмерные случаи с учётом реальных условий производства.

Кроме теоретических результатов в работе описан технологический процесс изготовления линзованных оптических волокон методом химического травления под действием УФ-излучения с последующей процедурой дополнительного оплавления с использованием самостоятельно разработанного сварочного аппарата. Проведение химического травления с термостатированием позволяет получать аксиконы более правильной формы. Завершает процесс изготовления ЛОВ этап дополнительного оплавления, при котором корректируется форма конуса, а заготовка приобретает необходимые геометрические параметры, определяющие фокус и ДПМ.

Предложенная методика позволяет изготавливать ЛОВ с заданными оптическими и геометрическими параметрами в лабораторных условиях и в

рамках мелкосерийного производства. Многоэтапная процедура подготовки структурных элементов и контроль за технологическим циклом производства позволяют обеспечить высокую воспроизводимость геометрических параметров ЛОВ, обладающих минимальными оптическими потерями. Строгое соблюдение позиционирования заготовки в зоне электродов при повторных оплавлениях обеспечивает высокую воспроизводимость характеристик ЛОВ на выходе.

Разработанная и описанная в главе автоматизированная установка для изготовления и дополнительной обработки ЛОВ представляет собой комплексную систему, объединяющую ряд взаимосвязанных подсистем, согласованная работа которых позволяет обеспечить высокую точность и воспроизводимость результатов.

Механическая часть системы основана на трёхосевых микропозиционерах с высоким разрешением и повторяемостью позиционирования. Наличие энкодера, кнопок и OLED-экрана у микроконтроллера позволяет на интуитивном уровне эффективно управлять прибором.

Разработанная электрическая подсистема даёт возможность задавать длительность, частоту и последовательность импульсов, подаваемых на электроды. Управление системой позволяет изготавливать линзованные оптические волокна с заданными оптическими и геометрическими параметрами в условиях мелкосерийного производства, сочетая прецизионную механику, управляемую термообработку и объективный контроль качества.

Усовершенствование установки, а именно внедрение оптической части, включающей в себя источник излучения и измеритель мощности, предоставит возможность в дальнейшем реализовать метод электродугового изготовления ЛОВ на базе разработанного аппарата.

В работе приведено описание методов измерения ключевых параметров ЛОВ, критически важных для практического применения их в ФИС. Результаты анализа демонстрируют, что качество и функциональность линзованных оптических волокон напрямую зависит от точного контроля геометрических, оптических и поверхностных характеристик.

По оценкам фокусное расстояние изготавливаемых линз, измеряемое методом Фабри–Перо, составило 4.37±2.39 мкм. Методика, основанная на регистрации интерференционного сигнала при перемещении ЛОВ относительно зеркала с шагом 1 мкм, обеспечивает высокую точность определения точки фокуса, что критично для применения линз в микроскопии и оптической связи.

Диаметр поля моды линзованного волокна, измеренный с помощью эталонного сканирующего волокна, позволяет оценить эффективный размер светового пучка в дальнем поле. В ряде приложений, особенно в биомедицинских задачах, где критически важна высокая пространственная локализация излучения (например, при точечном воздействии на клеточные структуры), минимизация диаметра пучка в фокусе имеет приоритет над величиной вносимых потерь. Последние, в свою очередь, могут быть компенсированы увеличением входной оптической мощности без ущерба для минимально достижимого размера перетяжки. Таким образом, данная особенность представляет значительный практический интерес при проектировании микролинзовых наконечников для прецизионных биофотонных систем.

Методика измерения оптических потерь «линза»-UHNA обеспечивает объективную оценку, вносимых элементами потерь при использовании ЛОВ при стыковке ОВ с ФИС. Оптимизация технологических процессов в дальнейшем позволит минимизировать полученные величины, а значит обеспечит рост эффективности систем.

Оценка шероховатости ЛОВ, измеренной методом лазерной конфокальной микроскопии, по критерию Рэлея показала, что коническую поверхность можно считать оптически гладкой, а изготавливаемые линзы пригодными для использования в телекоммуникации.

Представленные методы измерений и их автоматизация создают основу для контроля качества линзованных оптических волокон на всех этапах производства. Интеграция точных измерительных процедур с программными решениями позволяет не только обеспечить воспроизводимость параметров, но и оптимизировать технологические циклы, что критично для внедрения линз в высокоточные приложения, такие как медицинская диагностика, телекоммуникация и лазерные системы. Результаты исследования подчеркивают необходимость междисциплинарного подхода, объединяющего оптику, материаловедение и автоматизацию, для дальнейшего развития волоконно-оптических технологий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 24-91-21001).

Список литературы

1. *Piccirillo F. et al.* Miniaturized lenses integrated on optical fibers: Towards a new milestone along the lab-on-fiber technology roadmap // Results in Optics. 2022. Vol. 6, 100203.
2. *Ghenuche P., Rigneault H., Wenger J.* Hollow-core photonic crystal fiber probe for remote fluorescence sensing with single molecule sensitivity // Optics Express. 2012. Vol. 20, № 27. P. 28379–28387. DOI: 10.1364/OE.20.028379
3. *Zelgowski J. et al.* Photonic jet subwavelength etching using a shaped optical fiber tip // Optics Letters. 2016, Vol. 41, № 9. P. 2073–2076. DOI: 10.1364/OL.41.002073
4. *Bouaziz D. et al.* Photonic jet-shaped optical fiber tips versus lensed fibers // Photonics MDPI 2021,

Vol. 8, № 9, 373. DOI: 10.3390/photonics8090373
5. *Xiong Y., Xu F.* Multifunctional integration on optical fiber tips: challenges and opportunities // Advanced Photonics. 2020. Vol. 2, № 6, 064001. DOI: 10.1117/1.AP.2.6.064001
6. Tapered and lensed fibers. Datasheet. OZ Optics. (Электронный ресурс) URL: https://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0080.pdf (Дата обращения: 28.04.2026).
7. *Pawar D., Kale S. N.* A review on nanomaterial-modified optical fiber sensors for gases, vapors and ions // Microchimica Acta. 2019. Vol. 186, № 4. P. 1–34. DOI: 10.1007/s00604-019-3345-5
8. *Islam M. R. et al.* Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review // Sensors. 2014. Vol. 14, № 4. P. 7451–7488. DOI: 10.3390/s140407451
9. *Zhang Y. et al.* Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors // Sensors and Actuators B: Chemical. 2017. Vol. 244. P. 393–416. DOI: 10.1016/j.snb.2016.12.126
10. *Shao J. et al.* A new hydrogen sensor based on SNS fiber interferometer with Pd/WO_3 coating // Sensors. 2017. Vol. 17, № 9, 2144. DOI: 10.3390/s17092144
11. *Yan H. et al.* A fast response hydrogen sensor with Pd metallic grating onto a fiber's end-face // Optics Communications. 2016. Vol. 359. P. 157–161. DOI: 10.1016/j.optcom.2015.10.057
12. *Yu C. et al.* Fiber-optic Fabry–Perot hydrogen sensor coated with Pd-Y film // Photonic Sensors. 2015. Vol. 5, № 2. P. 142–145. DOI: 10.1007/s13320-015-0285-8
13. *Li Y. et al.* Optical cascaded Fabry–Perot interferometer hydrogen sensor based on vernier effect // Optics Communications. 2018. Vol. 414. P. 166–171. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.01.028
14. Gangopadhyay T. K. et al. Fabrication of tapered single mode fiber by chemical etching and used as a chemical sensor based on evanescent field absorption // SPIE Proceedings. 2011. Vol. 8173. P. 500–509. DOI: 10.1117/12.896999
15. *Zhang E. J., Sacher W. D., Poon J. K. S.* Hydrofluoric acid flow etching of low-loss subwavelength-diameter biconical fiber tapers // Optics Express. 2010. Vol. 18, № 21. P. 22593–22598. DOI: 10.1364/OE.28.RA4
16. *Son G., Jung Y., Yu K.* Tapered optical fiber couplers fabricated by droplet-based chemical etching // IEEE Photonics Journal. 2017. Vol. 9, № 5, P. 1–8. DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2753568
17. *Chenari Z. et al.* Adiabatic tapered optical fiber fabrication in two step etching // Optics and Laser Technology. 2016. Vol. 76. P. 91–95. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.08.023
18. *Stöckle R. et al.* High-quality near-field optical probes by tube etching // Applied Physics Letters. 1999. Vol. 75, № 2. P. 160–162. DOI: 10.1063/1.124305
19. *Puygranier B. A. F., Dawson P.* Chemical etching of optical fibre tips-experiment and model // Ultramicroscopy. 2000. Vol. 85. № 4. P. 235–248.
20. *Нурмухаметов Д. И., Шмырова А. И., Корнилицын А. Р., Пономарев Р. С., Паньков А. С.* Интенсификация процесса формирования микролинз на торце оптических волокон при жидкостном травлении под действием гидродинамического течения, генерируемого инфракрасным излучением // Фотон-экспресс. 2023. Т. 190, № 6. С. 184–185.
21. *Шмырова А. И., Нурмухаметов Д. И., Корнилицын А. Р., Пономарёв Р. С., Паньков А. С.* Ускоренное изготовление микролинз на торце оптических волокон методом жидкостного травления, интенсифицированного инфракрасным излучением // Тезисы докладов VIII Всерос. науч. конф. «Теплофизика и физическая гидродинамика». Махачкала, 2023. С. 182.
22. *Шмырова А. И., Нурмухаметов Д. И., Корнилицын А. Р., Пономарёв Р. С., Паньков А. С.* Изготовление линзированных волокон методом химического травления под влиянием гидродинамического течения, генерируемого инфракрасным излучением // Тезисы докладов Всерос. конф. «XXIII Зимняя школа по механике сплошных сред». Пермь, 2023. С. 381.
23. *Hadi S. M., Abdullah M. M., Mahdi M. S.* Computer vision of optimal geometric concentration ratio for the solar ball lens // Iraqi Journal of Science. 2022. Vol. 63, № 9. P. 3727–3736.
24. *Barbero S.* Multifocal wavefronts with prescribed caustics in axially symmetric optical systems // Optics Express. 2022. Vol. 30, № 9. P. 14274–14286. DOI: 10.1364/OE.453876
25. *Smarra M., Gurevich E. L., Ostendorf A.* Theoretical simulation and experimental verification of dynamic caustic manipulation using a deformable mirror for laser material processing // Optics and Laser Technology. 2022. Vol. 149, 107814. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.107814
26. *Pankov A. S., Ponomarev R. S.* Microlenses formation by electric arc at the end of optical fibres, preserving the polarization of optical radiation // J. Phys. Math. 2024. Vol. 75, № 3. P. 138–141.
27. *Sokolchik D. P., Pankov A. S., Ponomaryov R. S.* Measurement of the parameters of lensed fibers for application in integrated photonics // Proc. of 24th IEEE International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). 2023. P. 900–903. DOI: 10.1109/EDM57655.2023.10224597
28. *Carpena P., Coronado A. V.* On the focal point of a lens: beyond the paraxial approximation // European Journal of Physics. 2006. Vol. 27, № 2. P. 231–241. DOI: 10.1088/0143-0807/27/2/006
29. *Денисов Д. Г.* Измерение параметров шероховатостей шлифованных и полированных оптических поверхностей с помощью высокоточных методов лазерной

интерферометрии // Успехи прикладной физики. 2017. № 5. С. 393–411.
30. Конин Ю. А., Гаранин А. И., Перминов А. В. Дефектоскопия оптических волокон и заготовок методом голографической интерферометрии // Прикладная фотоника. 2015. Т. 2, № 2, С. 154–165.
31. *Баграташвили В. Н.* и др. Рефлектометрическая диагностика процесса травления кварцевого оптического волокна с германийсиликатной сердцевиной в суб- и сверхкритической воде // Сверхкритические Флюиды: Теория и Практика. 2009. Т. 4, № 3, С. 39–55.

References

1. Piccirillo F. et al. Miniaturized lenses integrated on optical fibers: Towards a new milestone along the lab-on-fiber technology roadmap. *Results in Optics*, 2022, vol. 6, 100203.
2. Ghenuche P., Rigneault H., Wenger J. Hollow-core photonic crystal fiber probe for remote fluorescence sensing with single molecule sensitivity. *Optics express*, 2012, vol. 20, no. 27, pp. 28379–28387. DOI: 10.1364/OE.20.028379
3. J. Zelgowski, et al. Photonic jet subwavelength etching using a shaped optical fiber tip. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 9, pp. 2073–2076. DOI: 10.1364/OL.41.002073
4. Bouaziz D. et al. Photonic jet-shaped optical fiber tips versus lensed fibers. *Photonics MDPI*, 2021, vol. 8, no. 9, 373. DOI: 10.3390/photonics8090373
5. Xiong Y., Xu F. Multifunctional integration on optical fiber tips: challenges and opportunities. *Advanced Photonics*, 2020, vol. 2, no. 6, 064001. DOI: 10.1117/1.AP.2.6.064001
6. Datasheet. Tapered and lensed fibers, OZ Optics. URL:https://www.ozoptics.com/ALLNEW_PDF/DTS0080.pdf.
7. Pawar D., Kale S. N. A review on nanomaterial-modified optical fiber sensors for gases, vapors and ions. *Microchimica Acta*, 2019, vol. 186, no. 4, pp. 1–34. DOI: 10.1007/s00604-019-3345-5
8. Islam M. R. et al. Chronology of Fabry-Perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: a review. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 7451–7488. DOI: 10.3390/s140407451
9. Zhang Y. et al. Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, vol. 244, pp. 393–416. DOI: 10.1016/j.snb.2016.12.126
10. Shao J. et al. A new hydrogen sensor based on SNS fiber interferometer with Pd/WO_3 coating. *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 9, 2144. DOI: 10.3390/s17092144
11. Yan H. et al. A fast response hydrogen sensor with Pd metallic grating onto a fiber's end-face. *Optics Communications*, 2016, vol. 359, pp. 157–161. DOI: 10.1016/j.optcom.2015.10.057
12. Yu C. et al. Fiber-optic Fabry–Perot hydrogen sensor coated with Pd-Y film. *Photonic Sensors*, 2015, vol. 5, no. 2, pp. 142–145. DOI: 10.1007/s13320-015-0285-8
13. Li Y. et al. Optical cascaded Fabry–Perot interferometer hydrogen sensor based on vernier effect. *Optics Communications*, 2018, vol. 414, pp. 166–171. DOI: 10.1016/j.optcom.2018.01.028
14. Gangopadhyay T. K. et al. Fabrication of tapered single mode fiber by chemical etching and used as a chemical sensor based on evanescent field absorption. *SPIE Proceedings*, 2011, vol. 8173, pp. 500–509. DOI: 10.1117/12.896999
15. Zhang E. J., Sacher W. D., Poon J. K. S. Hydrofluoric acid flow etching of low-loss subwavelength-diameter biconical fiber tapers. *Optics Express*, 2010, vol. 18, no. 21, pp. 22593–22598 DOI: 10.1364/OE.28.RA4
16. Son G., Jung Y., Yu K. Tapered optical fiber couplers fabricated by droplet-based chemical etching. *IEEE Photonics*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 1–8. DOI: 10.1109/JPHOT.2017.2753568
17. Chenari Z. et al. Adiabatic tapered optical fiber fabrication in two step etching. *Optics and Laser Technology*, 2016, vol. 76, pp. 91–95. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.08.023
18. Stöckle R. et al. High-quality near-field optical probes by tube etching. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 75, no. 2, pp. 160–162. DOI: 10.1063/1.124305
19. Puygranier B. A. F., Dawson P. Chemical etching of optical fibre tips-experiment and model. *Ultramicroscopy*, 2000, vol. 85, no. 4, pp. 235–248.
20. Nurmukhametov D. I., Shmyrova A. I., Kornilitsyn A. R., Ponomarev R. S., Pankov A. S. Intensification of the process of forming micro-lenses at the end of optical fibers during liquid etching under the influence of a hydrodynamic flow generated by infrared radiation. *Photon Express*, 2023, vol. 190, no. 6, pp. 184–185 (In Russian).
21. Shmyrova A. I., Nurmukhametov D. I., Kornilitsyn A. R., Ponomarev R. S., Pankov A. S. Accelerated production of micro-lenses at the end of optical fibers using liquid etching intensified by infrared radiation. *Abstr. of VIII All-Russian Scientific Conference on Thermophysics and Physical Hydrodynamics*, September 4–10, 2023, Makhachkala, p. 182 (In Russian).
22. Shmyrova A. I., Nurmukhametov D. I., Kornilitsyn A. R., Ponomarev R. S., Pankov A. S. Production of lensed fibers by chemical etching under the influence of a hydrodynamic flow generated by infrared radiation. *Collection of abstracts of the All-Russian Conference XXIII Winter School on Continuum Mechanics*, February 13–17, 2023, Perm. P. 381 (In Russian).
23. Hadi S. M., Abdullah M. M., Mahdi M. S. Computer Vision of Optimal Geometric Concentration Ratio for the Solar Ball Lens. *Iraqi Journal of Science*, 2022, vol. 63, no. 9, pp. 3727–3736.

24. Barbero S. Multifocal wavefronts with prescribed caustics in axially symmetric optical systems. *Optics Express*, 2022, vol. 30, no. 9, pp. 14274–14286. DOI: 10.1364/OE.453876
25. Smarra M., Gurevich E. L., Ostendorf A. Theoretical simulation and experimental verification of dynamic caustic manipulation using a deformable mirror for laser material processing. *Optics and Laser Technology*, 2022, vol. 149, 107814. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.107814
26. Pankov A. S., Ponomarev R. S. Microlenses formation by electric arc at the end of optical fibres, preserving the polarization of optical radiation. *J. Phys. Math.*, 2024, vol. 75, no. 3, pp. 138–141.
27. Sokolchik D. P., Pankov A. S., Ponomaryov R. S. Measurement of the parameters of lensed fibers for application in integrated photonics. *IEEE 24th Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, 2023, pp. 900–903. DOI: 10.1109/EDM57655.2023.10224597
28. Carpena P., Coronado A. V. On the focal point of a lens: beyond the paraxial approximation. *European journal of physics*, 2006, vol. 27, no. 2, pp. 231–241. DOI: 10.1088/0143-0807/27/2/006
29. Denisov D. G. Measurement of roughness parameters of ground and polished optical surfaces using high-precision laser interferometry methods. *Advances in Applied Physics*, 2017, no. 5, pp. 393–411 (In Russian).
30. Konin Yu. A., Garanin A. I., Perminov A. V. Defectoscopy of optical fibers and blanks using holographic interferometry. *Applied Photonics*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 154–165 (In Russian).
31. Bagratashvili V. N. et al. Reflectometric diagnostics of the etching process of quartz optical fiber with a germanium silicate core in sub- and supercritical water. *Supercritical Fluids: Theory and Practice*, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 39–55.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Гордеева А. И., Жуков Л. О., Нурмухаметов Д. И., Корнилин Д. А., Паньков А. С., Сокольчик Д. П., Толстых С. С., Журавлев А. А., Хаснуллин Ф. Е., Рогозина А. Е., Конев М. Д., Демин Ф. В., Пономарёв Р. С. Формирование линзованных оптических волокон с заданными свойствами: математическое моделирование, эксперимент // Вестник Пермского университета. Физика. 2026. № 3. С. 47–65. doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-47-65

Please cite this article in English as:
Gordeeva A. I., Zhukov L. O., Nurmukhametov D. I., Kornilin D. A., Pankov A. S., Sokolchik D. P., Tolstykh S. S., Zhuravlev A. A., Khasnullin F. E., Rogozina A. E., Konev M. D., Demin F. V., Ponomarev R. S. Formation of lensed optical fibers with specified properties: mathematical modeling, an experiment. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2026, no. 3, pp. 47–65. doi: 10.17072/1994-3598-2026-3-47-65

Сведения об авторах

1. *Анастасия Ивановна Гордеева*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
2. *Леонид Олегович Жуков,* инженер-исследователь лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
3. *Даниль Ильдарович Нурмухаметов*, канд. тех. наук, научный сотрудник лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
4. *Даниил Алексеевич Корнилин,* инженер-исследователь лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
5. *Анатолий Сергеевич Паньков*, научный сотрудник лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
6. *Дарья Павловна Сокольчик,* младший научный сотрудник лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
7. *Степан Сергеевич Толстых,* лаборант студенческого конструкторского бюро микроэлектроники и робототехники Физико-математического института, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
8. *Александр Андреевич Журавлев,* инженер-исследователь лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
9. *Феофил Евгеньевич Хаснуллин,* лаборант лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
10. *Алина Евгеньевна Рогозина,* лаборант лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068

11. *Михаил Дмитриевич Конев,* лаборант лаборатории микро- и наногидродинамики, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
12. *Федор Витальевич Демин,* младший научный сотрудник лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
13. *Роман Сергеевич Пономарев*, канд. физ.-мат. наук, заведующий лаб. интегральной фотоники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068

Author information

1. *Anastasiia I. Gordeeva*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
2. *Leonid O. Zhukov*, Research Engineer, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
3. *Danil' I. Nurmukhametov,* Candidate of Engineering Sciences, Researcher, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
4. *Daniil A. Kornilin*, Research Engineer, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
5. *Anatolii S. Pankov*, Researcher, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
6. *Daria P. Sokolchik*, Junior Researcher, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
7. *Stepan S. Tolstykh*, Laboratory Assistant, Student Design Bureau of Microelectronics and Robotics, Physics and Mathematics Institute, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
8. *Aleksandr A. Zhuravlev*, Research Engineer, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
9. *Feofil E. Khasnullin*, Laboratory Assistant, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
10. *Alina E. Rogozina*, Laboratory Assistant, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
11. *Mikhail D. Konev*, Laboratory Assistant, Micro- and Nanoydrodynamics Laboratory, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
12. *Fedor V. Demin*, Junior Researcher, Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
13. *Roman S. Ponomarev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Integrated Photonics, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia