

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 532.71; 532.73–3

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.014

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ БУФЕРНОГО СЛОЯ НА ФОРМУ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ЛИНЗОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

**Даниил Алексеевич Корнилин¹, Роман Сергеевич Пономарев²,
Виталий Анатольевич Демин^{3†}**

^{1, 2, 3} Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, 614068, Пермь, Россия

¹ kornilin.daniil@mail.ru

² rsponomarev@gmail.com

³ demin@psu.ru[†]

Аннотация. Экспериментально изучено влияние толщины буферного слоя ксилола на форму конической поверхности на конце оптического одномодового волокна при формировании аксионов методом химического травления в растворе плавиковой кислоты. Получены и проанализированы фотографии линзованных торцов волокна с различным знаком кривизны поверхности. Указанные кварцевые линзованные волокна предназначены для ввода оптического излучения в разные элементы фотонных интегральных схем. Определена зависимость формы конуса от толщины буферного слоя при заданных параметрах технологического процесса. Обнаружено, что при травлении оптических волокон образуется утоньшение оболочки в воздушной среде за счет образования капель раствора плавиковой кислоты из паров выше уровня границы раздела ксилол-воздух. Для уменьшения влияния данного эффекта требуется увеличение толщины буферного слоя, который должен предотвращать диффузию молекул плавиковой кислоты в воздушное пространство реактора. С другой стороны, уменьшение буферного слоя может использоваться для формирования перетяжек с регулируемой толщиной вытравленной области на участках волокна при удалении от линзованного торца. Подобные перетяжки могут применяться для конструирования оптических датчиков, в основе работы которых лежит контакт сердцевины волокна с исследуемой средой.

Ключевые слова: линзованные оптические волокна, химическое травление, буферный слой.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания «Разработка элементной базы фотонных систем для задач телекоммуникаций и сенсорных применений» № 124050300016-0.

Для цитирования: Корнилин Д.А., Пономарев Р.С., Демин В.А. Экспериментальное исследование влияния толщины буферного слоя на форму заготовок для линзованных оптических волокон // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 3. С. 396–403. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.014.

Original article

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BUFFER LAYER THICKNESS ON THE SHAPE OF LENSED OPTICAL FIBERS

Daniil A. Kornilin¹, Roman S. Ponomarev², Vitaly A. Demin^{3†}

^{1, 2, 3} Perm State National Research University, Bukirev St., 15, Perm, 614068, Russia

¹ kornilin.daniil@mail.ru

² rsponomarev@gmail.com

³ demin@psu.ru[†]

Abstract. The effect of the thickness of a xylene buffer layer on the shape of conical surface at the end of a single-mode optical fiber during the formation of axicons by chemical etching in a hydrofluoric acid solution was studied experimentally. Photographs of lensed fiber ends with different signs of surface curvature were obtained and analyzed. These quartz lensed fibers are intended for inputting optical radiation into various elements of photonic in-

tegrated circuits. The dependence of the cone shape on the thickness of the buffer layer was determined for given parameters of the technological process. It was found that when optical fibers are etched, a thinning of the cladding is formed in an air environment due to the formation of droplets of a hydrofluoric acid solution from the vapor above the xylene-air interface. To reduce the influence of this effect, it is necessary to increase the thickness of the buffer layer, which should prevent the diffusion of hydrofluoric acid molecules into the air space of the reactor. On the other hand, reducing the buffer layer can be used to form waists with adjustable thickness of the etched area on sections of the fiber away from the lensed end. Such constrictions can be used to design optical sensors, the operation of which is based on the contact of the fiber core with the medium under study.

Keywords: lensed optic fibers, chemical etching, buffer layer.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment «Development of the element base of photonic systems for telecommunications and sensor applications» No. 124050300016-0.

For citation: Kornilin, D. A., Ponomarev, R. S. & Demin, V. A. (2024). Experimental investigation of the effect of buffer layer thickness on the shape of lensed optical fibers. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(3), 396–403. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.014.

Введение

Линзованные оптические волокна широко применяются в интегральной оптике для сборки фотонных интегральных схем [1-3]. Использование таких волокон позволяет сфокусировать излучение в пятно размером порядка 1-2 мкм, что дает возможность проводить стыковку оптического волокна и интегральной схемы через воздушную среду без использования оптического клея в области распространения света [4]. Существует множество методов формирования линзованных оптических волокон, например, формирование на конце волокна полимерной линзы [5], формирование линз с помощью фоторезиста [6], оплавлением кончика оптического волокна, а также создание линз для волоконной оптики при помощи аддитивных технологий [7, 8]. Одним из наиболее распространенных методов производства линзованных волокон является химическое травление, который используется для решения множества задач интегральной оптики [9-12]. Методы химического травления оптического волокна получили также довольно широкое распространение при создании датчиков, принцип работы которых основан на плазмонном резонансе, а также для создания тейперов [13-16]. При химическом травлении линзованных волокон весь процесс протекает в объеме водного раствора плавиковой кислоты на границе раздела с буферным слоем, располагающимся поверх слоя плавиковой кислоты [17]. Такой метод производства позволяет добиться потерь на стыке около 3 дБ [18, 19]. Варьируя геометрические параметры линзованных оптических волокон, можно значительно расширить область их применения, получая пучки с заданным распределением интенсивности излучения [20].

Хотя в процессе травления исследователи уделяют большое внимание концентрации кислоты, времени травления и некоторым другим факторам, практически без внимания остается влияние толщины буферного слоя на параметры конуса линзованных волокон [21-23].

Целью работы является выявление влияния изменения формы образцов оптических волокон в зависимости от толщины буферного слоя, а также феноменологическое описание эффектов, наблюдаемых при травлении и влияющих на конечный результат.

Описание установки и методика эксперимента

Для получения линзованных оптических волокон методом химического травления использовалась установка, состоящая из ванночки, изготовленной из полипропилена, химически стойкого к плавиковой кислоте, фиксатора оптического волокна и механического микропозиционера. Волокно закреплялось в фиксаторе, а затем с помощью микропозиционера вводилось в травитель таким образом, что конец волокна погружался в раствор плавиковой кислоты на глубину 1-2 мм (рис.1). Подвижной механизм позволяет перемещать волокно с точностью до 10 мкм. Это соизмеримо с величиной мениска, который возникает вблизи поверхности волокна вследствие капиллярных сил. Таким образом, этот механизм позволяет контролировать положение волокна в кислоте с учетом краевых эффектов.

В качестве травителя использовался 40-процентный раствор плавиковой кислоты, а в качестве буферного слоя – ксилол, толщина которого менялась в интервале от 2 мм до 15 мм. Травление производилось на одномодовом

кварцевом волокне типа SMF-28. Эксперименты выполнялись при температуре 25 °С с контролируемой погрешностью ± 1 °С. Время травления для каждого образца составляло 1,5 часа.

Прозрачные стенки кюветы давали возможность визуально наблюдать за процессом травления и фиксировать форму поверхности волокна методом фотосъемки. Частично процесс травления снимался на видеокамеру с объективом, дающим пятикратное увеличение. Для определения параметров конуса линзованных оптических волокон использовался оптический микроскоп с 10-ти или 20-ти кратным увеличением.

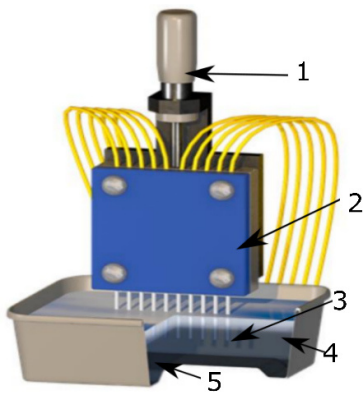


Рис.1. Схема установки для множественного травления оптических волокон: 1 – микропозиционер; 2 – фиксатор волокна; 3 – оптическое волокно; 4 – буферный слой; 5 – травитель

Fig.1. Schematic diagram of the installation for multiple etching of optical fibers: 1 – micropositioner; 2 – fiber clamp; 3 – optical fiber; 4 – buffer layer; 5 – etchant

Картина травления схематически представлена на рис. 2. При вводе оптического волокна сначала в буферный слой, а затем в кислоту, на границе раздела сред образуются мениски. Поверхность волокна является гидрофильной как по отношению к плавиковой кислоте, так и к ксилолу. Таким образом, рис.2 качественно верно отображает структуру мениска. На границе раздела кислота-буферный слой оптическое волокно вытравливается таким образом, что на его конце образуется конус, находящийся выше границы раздела. Необходимо отметить, что в процессе травления наблюдалось явление, при котором область, находящаяся между границей раздела сред, вытравливалась с большей скоростью, в результате чего отпадал участок волокна, находящийся в объеме травителя (рис.2).

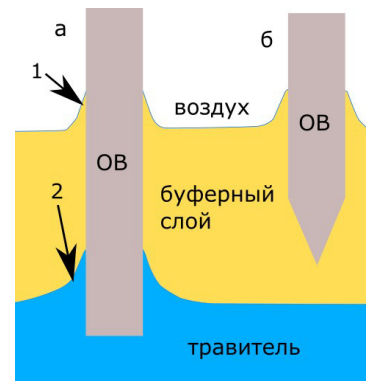


Рис.2. Процесс получения линзованных оптических волокон (ОВ); а) волокно в момент ввода, б) линзованное волокно после травления: 1 – мениск на границе раздела ксилол-воздух; 2 – мениск на границе раздела плавиковая кислота-ксилол

Fig.2. The process of obtaining lensed optical fibers (OF); a) fiber at the moment of input, b) lensed fiber after etching: 1 – meniscus at the xylene-air interface; 2 – meniscus at the hydrofluoric acid-xylene interface

В ходе экспериментов было выявлено, что длина конуса зависит от толщины буферного слоя, а именно, она растет при увеличении толщины этого слоя (рис.3).

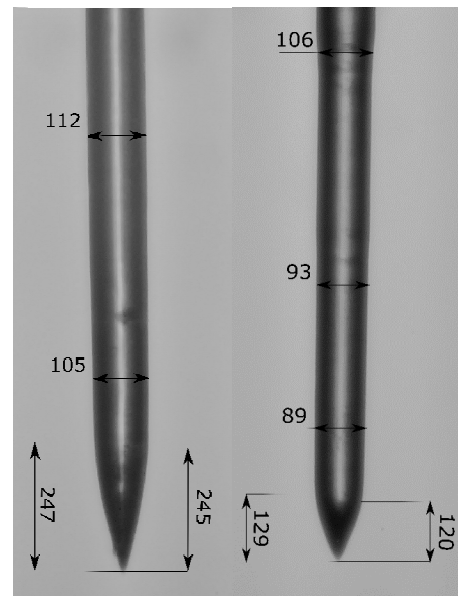


Рис.3. Линзованные оптические волокна, полученные методом химического травления. Параметры волокна на фотографиях приведены в микрометрах. Слева – при толщине буферного слоя 15 мм, справа – 6 мм

Fig.3. Lensed optical fibers obtained by chemical etching. The fiber parameters in the photographs are given in micrometers. On the left – with a buffer layer thickness of 15 mm, on the right – 6 mm

Подробное рассмотрение процесса травления с помощью системы технического зрения позволяет выделить для него несколько неочевидных особенностей. Визуально оценивая полученные линзованные оптические волокна, можно сделать вывод о том, что при более толстом буферном слое конус на конце оптического волокна имеет более правильную форму, а также меньшее количество дефектов, чем у образца, травление которого производилось в более тонком буферном слое.

Кроме того, эксперименты показывают, что процесс травления происходит значительно выше мениска на границе кислоты-ксилол. Толщина волокна в этом месте также уменьшается, причем, как видно из рис.3, при большей толщине буферного слоя этот процесс заметен в меньшей мере (90-100 мкм для слоя ксилола 6 мм и 105-110 мкм – для 15 мм соответственно). По-видимому, это связано с тем, что имеется значительный массопоток молекул плавиковой кислоты вверх вдоль поверхности волокна за счет поверхностной диффузии. Что каса-

ется формы конуса линзованных оптических волокон, то здесь требуется изготовить собирающую линзу, поэтому конус должен иметь выпуклую форму. Такой результат достигается при величине буферного слоя более 9 мм.

Если уменьшать толщину слоя ксилола, конус линзованного оптического волокна будет иметь прямую образующую.

Стоит отметить, что при толщине буферного слоя меньше 2 мм происходит значительное уменьшение толщины волокна с практически полным вытравливанием оболочки (рис.4). Данная структура наблюдается не только в буферном слое, но и выше его границы с воздухом. Как видно из рис.4, толщина стеклянной оболочки оптического волокна уменьшается со 125 мкм до 13.5 – 19 мкм (практически десятикратно), по сути, на этом участке практически полностью стравливается оболочка, оголяя сердцевину оптического волокна. Длина самого конуса при этом значительно меньше, чем могла бы быть при большей толщине буферного слоя.

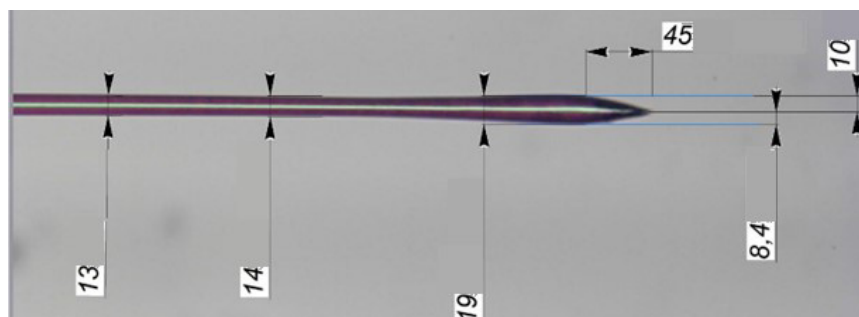


Рис.4. Линзованное оптическое волокно, полученное путем химического травления при толщине буферного слоя 2 мм. Параметры волокна на фотографиях также приведены в микрометрах. При такой толщине буферного слоя в ходе травления фактически остается только сердцевина волокна

Fig.4. Lensed optical fiber obtained by chemical etching with a buffer layer thickness of 2 mm. The fiber parameters in the photographs are also given in micrometers. With such a buffer layer thickness, only the fiber core actually remains during etching

Также стоит отметить, что во время процесса травления выше буферного слоя на поверхности оптического волокна образуются капли (рис.5) предположительно плавиковой кислоты, в результате чего происходит уменьшение толщины оболочки в этой области (рис.6). Этот вывод подтверждается результатами рамановской спектроскопии. Полученные спектры показывают наличие пиков, характерных для плавиковой кислоты. Немаловажно то, что образование этих капель происходит только на поверхности голого оптического волокна, в то время как защитное упрочняющее покрытие, состоящее из полиамида, визуально остается

абсолютно сухим. В процессе видеосъемки эксперимента наблюдалось небольшое уменьшение объема ксилола и плавиковой кислоты в кювете, что, свидетельствует об испарении этих жидкостей.

Процесс образования капель происходил следующим образом: на участке оптического волокна, находящегося в воздушной среде, зарождались и начинали расти капли, находящиеся визуально на одинаковом расстоянии друг от друга (рис.5). Капли становятся видимыми на камеру уже через 3-5 мин после начала травления. Практически сразу за счет концентрационно-капиллярных сил они приходят в

движение, сопровождающееся их слиянием. В результате верхние капли, опускаясь, проходят чуть больший путь, а нижние капли поднимаются на чуть меньшее расстояние. Таким образом, центр образования крупных капель находится на расстоянии порядка $1,5 \text{ мм} \pm 100 \text{ мкм}$ от поверхности ксилола. Система капель становится неустойчивой при достижении наибольшей каплей некоторого критического диаметра, после чего наступает момент ее обрушения.

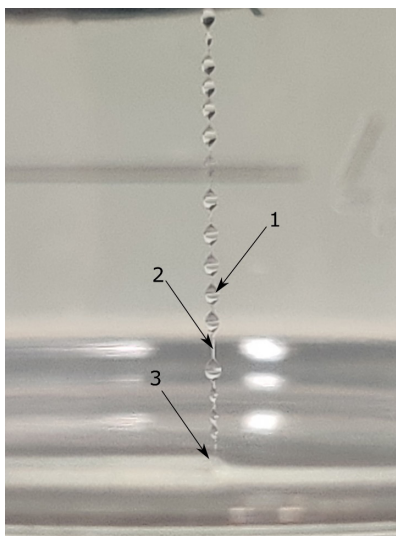


Рис.5. Капли на поверхности оптического волокна в воздушной среде. Толщина буферного слоя 8 мм: 1 – капли раствора кислоты в воздушной среде на поверхности ОВ; 2 – ОВ; 3 – мениск на границе раздела ксилол-воздух

Fig.5. Droplets on the surface of an optical fiber in an air environment. The thickness of the buffer layer is 8 mm: 1 – drops of acid solution in an air environment on the surface of the optical fiber; 2 – optical fiber; 3 – meniscus at the xylene-air interface

В сформированном виде продольные размеры капли составляют порядка 600 мкм, расстояние между центрами капель прибли-

тельно равно 800 мкм, с погрешностью $\pm 30 \text{ мкм}$. Как уже отмечалось, под действием поля тяжести происходит постепенное стекание капель к границе раздела воздух-ксилол и объединение их в капли с большим объемом. Примечательно, что движение этих больших капель, хоть и направлено вниз, тем не менее общая картина имеет, как уже отмечалось, более сложный возвратно-поступательный характер. При поглощении малых капель, что находятся выше на оптическом волокне, происходит поднятие большой капли, а при поглощении нижестоящих – опускание. Величина подъема при этом несколько меньше, чем величина опускания.

После того, как капля становится слишком большой и тяжелой, она стекает сначала в объем буферного слоя, а затем – в раствор кислоты.

Отдельного упоминания заслуживает грушевидная форма данных капель. Из-за действия силы тяжести центр их масс вполне закономерно смещен к нижней части тем сильнее, чем больше объем капли, что хорошо видно на рис.5.

Также важно упомянуть о том, что после травления области, находящейся в воздушной среде, поверхность оболочки имеет относительно гладкую форму, хотя капли травителя располагались на расстоянии друг от друга (рис.6). Можно предполагать, что в процессе травления происходит постоянное движение капель по длине волокна; причем влияет также образование перемычки в виде тонкого слоя раствора плавиковой кислоты на оболочке, в результате чего вытравленная область и получается такой гладкой.

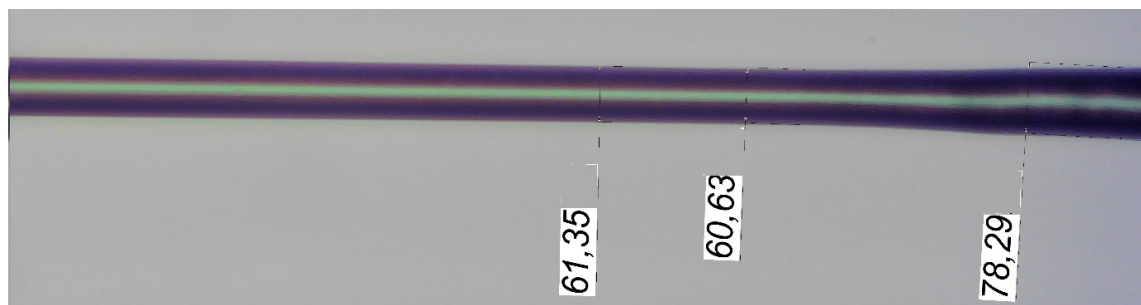


Рис.6. Утончение участка волокна, находящегося в воздушной среде. Толщина буферного слоя ксилола – 6 мм

Fig.6. Thinning of a section of fiber in an air environment. The thickness of the xylene buffer layer is 6 mm

Предпринимались попытки решить проблему диффузии молекул плавиковой кислоты в окружающее пространство путем создания дополнительной прослойки парафина, а именно свечного воска, который располагался между ксилолом и плавиковой кислотой, уменьшая величину мениска. Главный недостаток использования парафина заключается в том, что при нормальной температуре он находится в твердом состоянии, поэтому для осуществления процесса необходимы температуры не ниже 60 °С, в действительности рабочая температура повышается до 80 °С. Также, в результате данного дисбаланса температур вытекает еще один недостаток – при остывании парафина на поверхности волокна возможно образование пленки, затрудняющей прохождение оптического излучения. Таким образом, использование ксилола пока остается наиболее приемлемым способом травления оптического волокна.

Заключение

По результатам данного экспериментального исследования было выявлено непосредственное влияние толщины буферного слоя на форму линзованных оптических волокон. Величина буферного слоя влияет не только на длину, но и выпуклость конуса, получающегося на конце оптического волокна в процессе травления. Также, было замечено, что во время технологического процесса происходит вытравливание оболочки оптического волокна в воздушной среде, что носит, в целом, негативный характер и может влиять на прочностные характеристики конечного продукта.

Основываясь на результатах исследования, становится возможным создавать линзованные оптические волокна, конусы которых будут обладать различными геометрическими параметрами, зависящими от толщины буферного слоя.

Список литературы

1. Grattan K.T.V., Sun T. Fiber optic sensor technology: An overview // *Sens Actuators A Phys.* 2000. V. 82, N 1. P. 40–61.
2. Udd E. Overview of fiber optic sensors // *Fiber Optic Sensors, Second Edition*, 2017.
3. Koshelev A., Calafiore G., Piña-Hernandez C., Allen F.I., Dhuey S. et al. High refractive index Fresnel lens on a fiber fabricated by nanoimprint

lithography for immersion applications // *Opt. Lett.* 2016. V. 41, N 15. P. 3423–3426.

4. Pawar D., Kale S.N. Correction to: A review on nanomaterial-modified optical fiber sensors for gases, vapors and ions // *Microchimica Acta.* 2019. V. 186. 253.

5. Плеханов А.И., Шелковников В.В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // *Российские нанотехнологии.* 2006. Т. 1, № 1–2. С. 240–244.

6. Wu C.-C., Tseng Y.-D., Kuo S.-M., Lin C.-H. Fabrication of aspherical lensed optical fibers with an electro-static pulling of SU-8 photoresist // *Opt. Express.* 2011. V. 19, N 23. P. 22993–22998.

7. Blachowicz T., Ehrmann G., Ehrmann A. Optical elements from 3D printed polymers // *e-Polymers.* 2021. V. 21, N 1. P. 549–565.

8. Asadollahbaik A., Thiele S., Weber K., Kumar A., Drozella J. et al. Highly Efficient Dual-Fiber Optical Trapping with 3D Printed Diffractive Fresnel Lenses // *ACS Photonics.* 2020. V. 7, N 1. P. 88–97.

9. Судас Д.П., Кузнецов П.И., Голант К.М. Волоконный рефрактометр для мониторинга жизнедеятельности микроводорослей // *Радиотехника и электроника.* 2023. Т. 68, № 10. С. 1011–1014.

10. Судас Д.П., Кузнецов П.И. Покрyтия оксида олова (IV) с различной морфологией на поверхности утоненного кварцевого волоконного световода для применения в сенсорике // *Приборы и техника эксперимента.* 2023. № 5. С. 174–179.

11. Кузнецов П.И., Судас Д.П., Савельев Е.А. Формирование волоконных тейперов методом химического травления для применения в волоконных датчиках и лазерах // *Приборы и техника эксперимента.* 2020. № 4. С. 83–89.

12. Савельев Е.А., Кузнецов П.И., Судас Д.П., Якушева Г.Г. Сенсоры на основе химически травленного оптического волокна с покрытием из ZnTe // В сб. научных трудов X Международной конференции по фотонике и инфoрмационной оптике. Москва Москва, 27–29 января 2021 г. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2021. С. 147–148.

13. Chenari Z., Latifi H., Ghamari S., Hashemi R.S., Doroodmand F. Adiabatic tapered optical fiber fabrication in two step etching // *Opt. Laser Technol.* 2016. V. 76. P. 91–95.

14. Son G., Jung Y., Yu K. Tapered Optical Fiber Couplers Fabricated by Droplet-Based Chemical Etching // *IEEE Photonics J.* 2017. V. 9, N 5. P. 1–8.

15. Zhang E.J., Sacher W.D., Poon J.K.S. Hydrofluoric acid flow etching of low-loss subwavelength-diameter biconical fiber tapers // *Opt. Express.* 2010. V. 18, N 21. 22593.

16. Jafari J., Nouroozi R. Fabrication and Characterization of the Fiber Optical Taper for a Surface Plasmon Resonance Sensor // *International Journal of Optics and Photonics.* 2017. V. 11, N 1. P. 19–24.

17. Васильев М.Г., Васильев А.М., Голованов В.В., Изотов А.Д., Шелякин А.А. Метод ступенчатого травления оптического волокна // *Журнал неорганической химии.* 2016. Т. 61, № 9. С. 1218–1220.

18. Eisenstein G., Vitello D. Chemically Etched Conical Microlenses for Coupling Single Mode Lasers into Single Mode Fibers // *Applied Optics.* 1982. P. 3470–3474.

19. Minh P.N., Ono T., Haga Y., Inoue K., Sasaki M. et al. Bach fabrication of microlens at the end of optical fiber using self-photolithography and etching techniques // *Opt. Rev.* 2003. V. 10, N 3. P. 150–154.

20. Кумжичак А.А., Гурбатов С.О., Витрик О.Б., Кульчин Ю.Н. Технология создания волоконных микроаксионов для фокусировки лазерного излучения и генерации Бесселевых пучков // *Вестник ДВО РАН.* 2014. № 6. С. 123–131.

21. Meunier D., Schruyers J., Palla R.G., Mendoza C., Calberg C. et al. Controlled-chemical etching of the cladding in optical fibers for the design of analytical sensors // *Optical Fiber Technology.* 2023. V. 78. 103328.

22. Yuan Y., Wang L., Ding L., Wu C. Theory, experiment, and application of optical fiber etching // *Appl. Opt.* 2012. V. 51, N 24. P. 5845–5849.

23. Mononobe S., Ohtsu M. Fabrication of a pencil-shaped fiber probe for near-field optics by selective chemical etching // *Journal of Lightwave Technology.* 1996. V. 14, N 10. P. 2231–2235.

Информация об авторах

Д. А. Корнилин – аспирант Пермского государственного национального исследовательского университета.

Р. С. Пономарев – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, заведующий молодежной лабораторией интегральной фотоники Пермского государственного национального исследовательского университета.

В. А. Демин – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики Пермского государственного национального исследовательского университета.

References

1. Grattan, K. T. V. & Sun, T. (2000). Fiber optic sensor technology: An overview. *Sens Actuators A Phys.*, 82(1), 40–61.

2. Udd, E. (2017). Overview of fiber optic sensors. *Fiber Optic Sensors, Second Edition.*

3. Koshelev, A., Calafiore, G., Piña-Hernandez, C., Allen, F. I. & Dhuey, S. et al. (2016). High refractive index Fresnel lens on a fiber fabricated by nanoimprint lithography for immersion applications. *Opt. Lett.*, 41(15), 3423–3426.

4. Pawar, D. & Kale, S. N. (2019). Correction to: A review on nanomaterial-modified optical fiber sensors for gases, vapors and ions. *Microchimica Acta.*, 186, 253.

5. Plekhanov, A. I. & Shelkovnikov, V. V. (2006). Opticheskiye volokna s kontsevyimi fotopolimernymi mikrolinzami. *Rossiyskiye nanotekhnologii*, 1(1–2), 240–244. (In Russ.).

6. Wu, C.-C., Tseng, Y.-D., Kuo, S.-M. & Lin, C.-H. (2011). Fabrication of aspherical lensed optical fibers with an electro-static pulling of SU-8 photoresist. *Opt. Express*, 19(23), 22993–22998.

7. Blachowicz, T., Ehrmann, G. & Ehrmann, A. (2021). Optical elements from 3D printed polymers. *e-Polymers*, 21(1), 549–565.

8. Asadollahbaik, A., Thiele, S., Weber, K., Kumar, A. & Drozella, J. et al. (2020). Highly Efficient Dual-Fiber Optical Trapping with 3D Printed Diffractive Fresnel Lenses. *ACS Photonics*, 7(1), 88–97.

9. Sudas, D. P., Kuznetsov, P. I. & Golant, K. M. (2023). Volokonnyy refraktometr dlya monitoringa zhiznedeyatel'nosti mikrovodorosley. *Radiotekhnika i elektronika*, 68(10), 1011–1014. (In Russ.).

10. Sudas, D. P. & Kuznetsov, P. I. (2023). Pokrytiya oksida olova (IV) s razlichnoy mor-

fologiyey na poverkhnosti utonennoy kvartsevo-
volokonnoy svetovoda dlya primeneniya v sen-
sorike. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, (5), 174–
179. (In Russ.).

11. Kuznetsov, P. I., Sudas, D. P. & Savel'yev,
E. A. (2020). Formirovaniye volokonnykh
teyperov metodom khimicheskogo travleniya dlya
primeneniya v volokonnykh datchikakh i lazerakh.
Pribory i tekhnika eksperimenta, (4), 83–89. (In
Russ.).

12. Savel'yev, E. A., Kuznetsov, P. I., Sudas,
D. P. & Yakushcheva, G. G. (2021). Sensory na
osnove khimicheskogo travleniya opticheskogo
volokna s pokrytiyem iz ZnTe. *V sb. nauchnykh
trudov X Mezhdunarodnoy konferentsii po fotonike
i informatsionnoy optike. Natsional'nyy issle-
dovatel'skiy yadernyy universitet «MIFI»*, 147–
148. (In Russ.).

13. Chenari, Z., Latifi, H., Ghamari, S.,
Hashemi, R. S. & Doroodmand, F. (2016). Adia-
batic tapered optical fiber fabrication in two step
etching. *Opt. Laser Technol.*, 76, 91–95.

14. Son, G., Jung, Y. & Yu, K. (2017). Tapered
Optical Fiber Couplers Fabricated by Drop-
let-Based Chemical Etching. *IEEE Photonics J.*,
9(5), 1–8.

15. Zhang, E. J., Sacher, W. D. & Poon, J. K.
S. (2010). Hydrofluoric acid flow etching of low-
loss subwavelength-diameter biconical fiber tapers.
Opt. Express, 18(21), 22593.

16. Jafari, J. & Nouroozi, R. (2017). Fabrica-
tion and Characterization of the Fiber Optical Taper
for a Surface Plasmon Resonance Sensor. *Inter-
national Journal of Optics and Photonics*, 11(1),
19–24.

17. Vasil'yev, M. G., Vasil'yev, A. M.,
Golovanov, V. V., Izotov, A. D. & Shelyakin, A.
A. (2016). Metod stupenchatogo travleniya
opticheskogo volokna. *Zhurnal neorganicheskoy
khimii*, 61(9), 1218–1220. (In Russ.).

18. Eisenstein, G. & Vitello, D. (1982).
Chemically Etched Conical Microlenses for Cou-
pling Single Mode Lasers into Single Mode Fibers.
Applied Optics, 3470–3474.

19. Minh, P. N., Ono, T., Haga, Y., Inoue, K.
& Sasaki, M. et al. (2003). Batch fabrication of mi-
crolens at the end of optical fiber using self-
photolithography and etching techniques. *Opt. Rev.*,
10(3), 150–154.

20. Kumzhichak, A. A., Gurbatov, S. O.,
Vitrik, O. B. & Kul'chin, Yu. N. (2014). Tekhnologiya
sozdaniya volokonnykh
mikroaksikonov dlya fokusirovki lazernogo
izlucheniya i generatsii besselevykh puchkov.
Byulleten' DVO RAN, (6), 123–131. (In Russ.).

21. Meunier, D., Schruyers, J., Palla, R. G.,
Mendoza, C. & Calberg, C. et al. (2023). Con-
trolled-chemical etching of the cladding in optical
fibers for the design of analytical sensors. *Optical
Fiber Technology*, 78, 103328.

22. Yuan, Y., Wang, L., Ding, L. & Wu, C.
(2012). Theory, experiment, and application of op-
tical fiber etching. *Appl. Opt.*, 51(24), 5845–5849.

23. Mononobe, S. & Ohtsu, M. (1996). Fabri-
cation of a pencil-shaped fiber probe for near-field
optics by selective chemical etching. *Journal of
Lightwave Technology*, 14(10), 2231–2235.

Information about the authors

D. A. Kornilin – Graduate Student, Perm State
University.

R. S. Ponomarev – Candidate of Physical and
Mathematical Sciences, Associate Professor of the
Micro and Nanotechnology Department, Head of
the Laboratory of Integrated Photonics, Perm
State University.

V. A. Demin – Doctor of Physical and Mathe-
matical Sciences, Professor, Head of Theoretical
Physics Department, Perm State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.06.2024; одобрена после рецензирования 17.07.2024; принята к публикации
01.08.2024.

The article was received by the editorial board on 08 June 24; approved after reviewing 17 July 24; accepted for publication
01 Aug. 24.