

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 547.97: 535.8; 541.147

Н. О. СОБЕЩУК, И. Ю. ДЕНИСЮК, М. И. ФОКИНА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОКУСИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫМИ ТОРЦЕВЫМИ МИКРООПТИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, СФОРМИРОВАННЫМИ ПУТЕМ ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Исследуется эффективность фокусировки излучения полимерными микрооптическими элементами, сформированными на торце оптоволокна путем фотополимеризации в ограниченном объеме мономера.

*Ключевые слова:* волновод, оптоволокно, микрооптический элемент, сопряжение, самофокусировка, фотополлимер.

В настоящее время одна из основных проблем волоконной оптики — сопряжение оптических волокон различных диаметров и апертур, а также введение излучения полупроводниковых лазеров в волокно с наименьшими потерями. Одним из путей решения проблемы является создание микрооптических элементов непосредственно на торце оптоволокна с использованием методов самосогласования, что позволяет избежать последующей юстировки фокусирующей конструкции.

Среди различных методов изготовления торцевых микрооптических элементов, например, таких как оплавление лазером/газовой горелкой [1, 2], химическое травление волокна [3], нарезка ионным пучком [4], новой является технология получения на конце оптоволокна полимерных микроэлементов [5—7]. Эта технология обладает рядом преимуществ по сравнению с вышеперечисленными: несложностью реализации, отсутствием химического загрязнения, заведомой соосностью элемента со световедущей жилой волокна.

В основе данной технологии лежит формирование элементов методом фотополимеризации смеси мономеров, нанесенной на торец сколотого волокна, под действием исходящего непосредственно из волокна лазерного излучения. Это позволяет получать микрооптические элементы высокого качества, контролировать их размер и профиль, а также обеспечивает их самосогласование со световедущей жилой [7].

В настоящей статье исследуется эффективность полимерных микрооптических элементов, полученных путем фотополимеризации исходящим из волокна излучением в ограниченном объеме мономера. Метод получения элементов рассмотрен в работе [8]. В свободный конец многомодового волокна 50/125 (длина волокна 3 м, концы волокна — в коннекторах типа FC, потери в которых составляют около 0,15 дБ) вводилось излучение азотного лазера ( $\lambda = 337$  нм, частота 100 Гц, мощность отдельного импульса 1,6 кВт при длительности  $10^{-8}$  с), на другой — вертикально закрепленный — торец наносилась капля жидкой мономерной композиции; экспозиция варьировалась в широких пределах.

Выполнение ряда экспериментов с изменением условий фотополимеризации позволило выделить несколько определенных стадий роста полимерных микрооптических элементов [8]. На рис. 1 показан наиболее характерный профиль элемента, сформированного на торце оптоволокна при экспозиции 15 с.

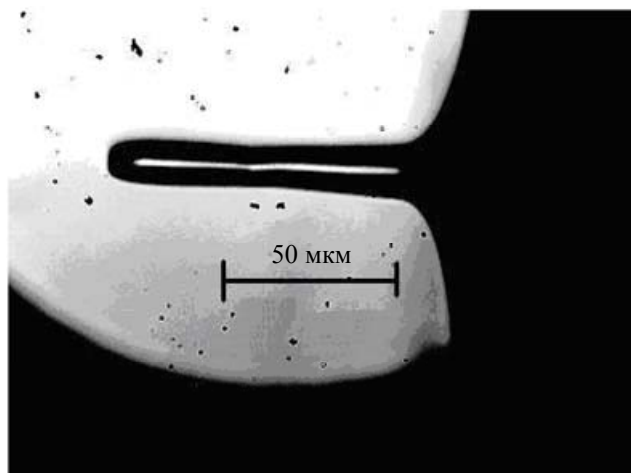


Рис. 1

Среди особенностей процесса роста могут быть выделены отсутствие уширения элементов, обусловленное ингибирующим действием кислорода, которое делает возможным образование самоорганизованной волноводной структуры, и увеличение радиуса кривизны микролинзы на конце элемента при большом времени облучения. Влияние процессов диффузии кислорода при формировании микрооптических элементов на основе акриловых мономеров подробно исследовано в работах [9—11], особенности технологического процесса роста элементов рассмотрены в работе [8].

Для исследования эффективности фокусировки излучения полученными микроструктурами был проведен анализ распределения светового поля излучения, выходящего из оптоволокна с торцевым микрооптическим элементом и без него.

На предметном столике микроскопа (МБИ 11У 4,2, увеличение 0,35—20<sup>×</sup>) вертикально фиксировался торец оптического волокна. Другой его конец закреплялся на определенном расстоянии от лазерного диода, излучение которого вводилось в волокно. Вместо одного из окуляров микроскопа использовалась веб-камера, соединенная с ноутбуком, что позволяло наблюдать излучение, выходящее из волокна, в режиме реального времени и на различных расстояниях от торца. Измерения как для „чистого“ торца оптоволокна, так и для торца с элементом производились с шагом 10 мкм от поверхности волокна либо от вершины микрооптического элемента.

Анализ данных осуществлялся с помощью программы обработки изображений ImageJ [12], позволяющей оценивать пространственное распределение яркости (в данном случае — интенсивности света) и обеспечивающей измерение и распределение интенсивности света, падающего на ПЗС-матрицу. На рис. 2 представлены данные, позволяющие визуально оценить эффективность преобразования структуры светового поля микрооптическим элементом: *a* — распределение излучения на выходе микрооптического элемента; *b* — распределение излучения на выходе из торца волокна; *в*, *г* — распределение интенсивности света ( $I(r)$ ) при выходе из оптоволокна и при выходе из микрооптического элемента соответственно.

Серия измерений наглядно показывает, что в элементе происходит перераспределение светового поля с фокусировкой всей энергии в фокальном пятне: на выходе микрооптического элемента сфокусированное излучение имеет большую яркость, чем при использовании волокна

без элемента. По мере удаления от элемента наблюдается расфокусировка пучка. Таким образом, полученный полимерный микрооптический элемент является микролинзой/фоконом, что позволяет существенно снизить потери при стыковке волокон.

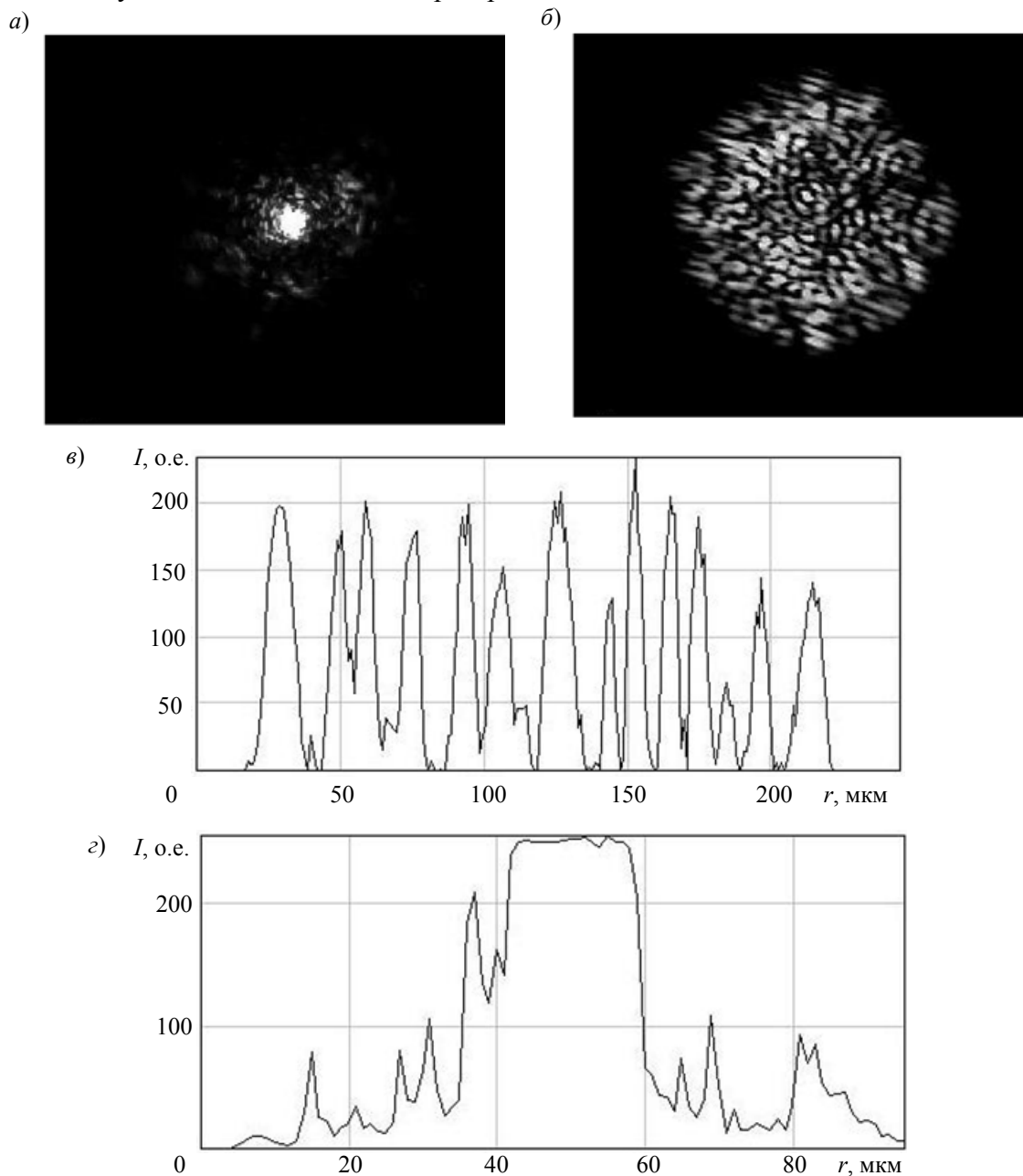


Рис. 2

В ходе ряда экспериментов были получены микрооптические элементы различной длины (экспозиция 30 с — длина 190 мкм, экспозиция 5 с — длина 170 мкм, экспозиция 4 с — длина 130 мкм, экспозиция 3 с — длина 70 мкм). Стоит заметить, что не все элементы получаются одинакового качества и обладают такой высокой эффективностью, как представленный выше. Эти данные не позволяют сделать однозначный вывод о связи эффективности микрооптического элемента и его длины, так как длина элемента, обладающего одними из лучших характеристик (см. рис. 2), составляет 220 мкм, тогда как длина лучшего образца во второй серии экспериментов составляет 130 мкм, а худшего — 190 мкм. С другой стороны, можно утверждать, что элементы достаточно большой длины (порядка 450 мкм) являются все же малоэффективными, хотя и обладают фокусирующим действием.

Не всегда в ходе эксперимента удается получить элемент симметричного профиля, возможно образование деформированных элементов. Однако, как показывают исследования, несмотря на асимметрию, такие образцы также достаточно эффективны и могут быть использованы. Причина подобной „деформации“ профиля элементов пока остается неясной.

Большинство микрооптических элементов, полученных в ходе эксперимента, имеют достаточно короткое фокусное расстояние, а фокальная плоскость расположена около вершины самого полимерного образования или на расстоянии 10—20 мкм от его поверхности, однако возможно получение образцов с бóльшим фокусным расстоянием.

Для подтверждения волноводной структуры микрооптических элементов и выяснения источника потерь был проведен эксперимент, в ходе которого в волокно с элементом на конце вводилось лазерное излучение, после чего элемент был сфотографирован в темноте (рис. 3).

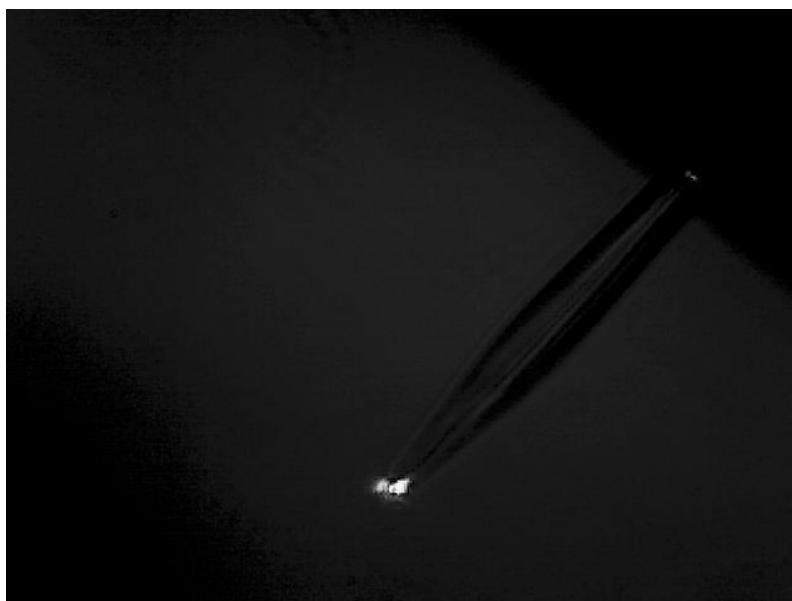


Рис. 3

Результаты эксперимента показывают, что в цилиндрической части элемента потери практически отсутствуют, рассеяние и поглощение в полимере невелико и может быть сведено к минимуму путем подбора соответствующей мономерной композиции. Это также свидетельствует о том, что сформированный оптический элемент действительно является волноводом с концевой микролинзой. „Избыточное“ свечение наблюдается в месте соединения волокна и микрооптического элемента, что может быть объяснено потерями на отражение на границе раздела сред кварц—полимер, так как их показатели преломления различны (кварц — 1,46, полимер — 1,52), а также тем, что диаметр элемента меньше диаметра световедущей жилы.

Исследования фокусирующих способностей полученных микроструктур показали, что данная технология позволяет формировать полимерные короткофокусные микрооптические элементы, которые могут быть успешно использованы для сопряжения многомодовых волокон с одномодовыми.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных при поддержке Рособразования, проект РПН 2.1.1.3937.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейко В. П., Березин Ю. Д., Чуйко В. А., Кромин А. К. Лазерные технологии формирования волоконно-оптических инструментов // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. Т. 61, № 8. С. 1627—1631.

2. Вейко В. П., Петров А. А. Применение волоконных микролинз для повышения оптических межсоединений // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2004. № 20. С. 68—84.
3. Yang Y., Lee J., Reichard K., Ruffin P., Liang F. Fabrication and implementation of a multi-to-single mode converter based on a tapered multimode fiber // Optic Communications. 2005. N 249. P. 129—137.
4. Schiapelli A., Kumar R., Prasciolu M., Cojoc D., Cabrini S. Efficient fiber-to-waveguide coupling by a lens on the end of the optical fiber fabricated by focused ion beam milling // Microelectronic Engineering. 2004. N 73—74. P. 397—404.
5. Hocinea M., Barchelot R., Ecoffet C., Fressengeasa N., Royer P., Kugel G. End-of-fiber polymer tip: manufacturing and modeling // Synthetic Metals. 2002. N 127. P. 313—318.
6. Barchelot R., Ecoffet C., Deloie D., Royer P. Integration of micrometer-sized polymer elements at the end of optical fibers by free-radical photopolymerization // Appl. Opt. 2001. Vol. 40, N 32. P. 5860—5871.
7. Плеханов А. И., Шелковников В. В. Оптические волокна с концевыми фотополимерными микролинзами // Рос. нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1—2. С. 240—244.
8. Фокина М. И., Собеуцук Н. О., Денисюк И. Ю. Исследование процессов формирования полимерного микроэлемента на торце оптического волокна в условиях значительного ингибирующего влияния кислорода на процесс фотополимеризации // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 3. С. 69—75.
9. Fokina M. I. Optical surface making by UV-curing of monomeric compositions in near field of coherent light source // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2007. Vol. 468. P. 385—394.
10. Fokina M. I., Burunkova J. E., Denisuk I. Yu. Influence of photoactive additive on growth of polymer microelements on the top of optical fiber // Proc. SPIE. 2007. P. 6732—6740.
11. Fokina M. I., Kaporskiy L. N., Denisuk I. Yu. Nature of microelements self writing in fiber tips in UV-curable composites // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2008. Vol. 497. P. 236—240.
12. Электронный ресурс: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>>.

**Сведения об авторах**

**Нина Олеговна Собеуцук**

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; инженер; E-mail: daedraazura@gmail.com

**Игорь Юрьевич Денисюк**

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

**Мария Ивановна Фокина**

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; науч. сотрудник; E-mail: mari2506@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
оптики квантово-размерных систем

Поступила в редакцию  
07.07.11 г.