

М. И. Фокина, Н. О. Собежук, И. Ю. Денисюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО МИКРОЭЛЕМЕНТА НА ТОРЦЕ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В УСЛОВИЯХ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО ИНГИБИРУЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА ПРОЦЕСС ФОТОПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Рассмотрен процесс формирования самоорганизованных полимерных микроэлементов на торце оптоволокна в ограниченном объеме фотополимера. Исследуются причины возникновения оптических потерь на стыке оптоволокна с микроэлементом.

Ключевые слова: волновод, оптоволокно, микролинза, сопряжение, самофокусировка, фотополимер.

Введение. Одной из актуальных задач волоконной оптики является сопряжение оптических волокон и введение излучения в волокно с наименьшими потерями. Соединение встык оптимально лишь для волокон равного диаметра с одинаковой апертурой, в других случаях требуется использование фокусирующей и коллимирующей конструкции. При введении в волокно излучения лазера или диода потери при соединении встык будут также неизбежны, поскольку размеры излучающей площадки как лазера, так и диода, больше диаметра волокна. Одним из возможных решений этой проблемы является использование торцевых фокусирующих микроэлементов.

В настоящее время разработано несколько эффективных методов, позволяющих получать микроэлементы, в том числе микролинзы, изготовленные как отдельно от волновода, так и непосредственно на торце оптоволокна. Создание микроэлементов на торце волокна предпочтительнее, поскольку изначально обеспечивает соосность элемента и волокна и отсутствие необходимости дальнейшего монтажа и юстировки.

Существует несколько наиболее известных способов получения торцевых микроэлементов, таких как оплавление лазером или газовой горелкой (элементы различного назначения) [1, 2], химическое травление волокна (фоконы) [3], нарезка ионным пучком (дифракционные микролинзы) [4]. Первые два уже нашли широкое применение, однако недостатком оплавления является возможная несоосность микроэлемента со световедущей жилой волокна, а недостатком травления — неизбежное химическое загрязнение поверхности. Технология нарезки ионным пучком позволяет получать микрорельеф очень высокого качества и с высоким разрешением, однако данный метод сложен в исполнении [4].

В последнее время проводятся многочисленные исследования в области получения на торце оптического волокна полимерных микроэлементов [5—7]. В основе метода лежит формирование элементов из мономерной композиции, нанесенной на торец, исходящим из волокна лазерным

излучением. Данная технология позволяет получать микроэлементы высокого качества, а также контролировать их размер и профиль [7]. Однако все разработки в этой, безусловно перспективной, области находятся на стадии лабораторных исследований, а экспериментальные результаты, представленные различными авторами, зачастую противоречивы, поскольку не учитываются зависимость процессов от типа использованного мономера, концентрации инициатора, объем мономера и скорость диффузии кислорода к области экспонирования.

В предшествующих работах нами были проведены исследования процессов формирования микроэлементов на торце оптоволокна и показана определяющая роль кислорода [8—10]. Кислород является ингибитором процесса фотополимеризации используемых акриловых мономеров и скорость его диффузии определяет скорость процесса формирования микроэлемента [11]. По этим причинам эксперименты, выполненные в настоящей работе, проводились в малом ограниченном объеме мономера — капле, нанесенной на торец оптоволокна, когда процессы ингибирования фотополимеризации кислородом, диффундирующим с поверхности капли в область экспонирования, наиболее сильно проявляются.

Эксперимент. Настоящая работа посвящена исследованию технологии получения полимерных микроэлементов на торце оптического волокна путем фотополимеризации исходящим из волокна излучением. На рис. 1 представлена схема проведения эксперимента по созданию торцевого элемента в ограниченном объеме мономерной композиции (d — диаметр).

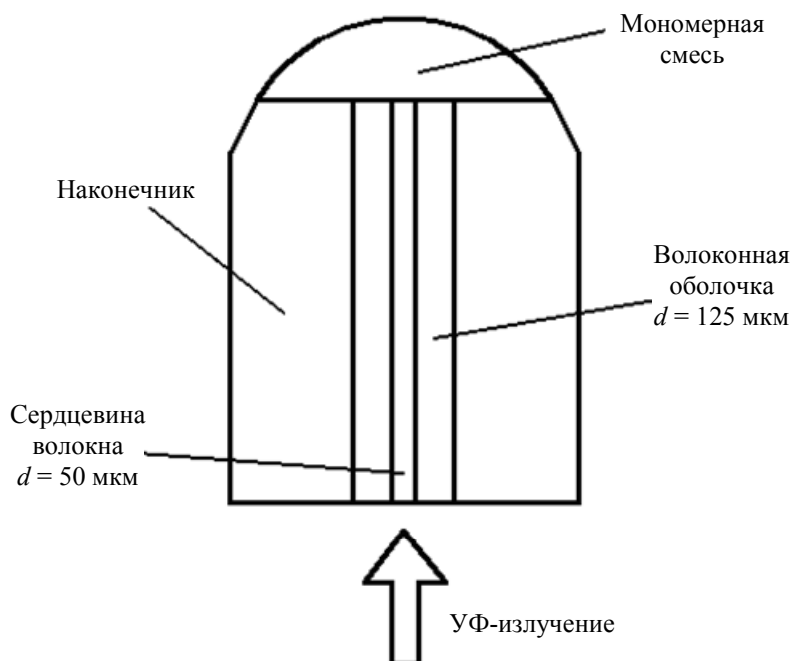


Рис. 1

В свободный конец многомодового волокна 50/125 вводилось излучение азотного лазера ($\lambda = 337$ нм), на другой — вертикально закрепленный — торец наносилась капля жидкой мономерной композиции, высота капли контролировалась визуально. В работе использовалась смесь акрилатов (в скобках указаны их массовые доли): 2-carboxyethyl acrylate (50 %), Bisphenol A glycerolate (20 %), 1,6-hexanediol diacrylate (10 %), Trimethylolpropane ethoxylate (1 EO/OH) methyl ether diacrylate (20 %). В качестве инициатора использовался dimetoksifenilatsetofenon (0,1 %) с максимумом поглощения на 250 нм. Показатель преломления композиции — 1,48. Экспозиция варьировалась от 3 до 45 с ($t = 3, 5, 10, 15, 25, 45$ с).

Ряд экспериментов позволил выделить несколько определенных этапов роста полимерных микроэлементов.

1. Процесс полимеризации начинается не мгновенно, а с того момента, как поглощенная мономером энергия достигнет определенного порогового значения. Задержка объясняется

тем, что первые импульсы уходят на выжигание кислорода в мономере, который является ингибитором процесса, а также на образование свободных радикалов из молекул инициатора. Этот этап формирования является инкубационным.

2. При минимальной экспозиции наблюдается образование квазисферической линзы (рис. 2). Данный этап является наиболее „трудновоспроизводимым“, поскольку процесс полимеризации протекает непрерывно с очень большой скоростью.

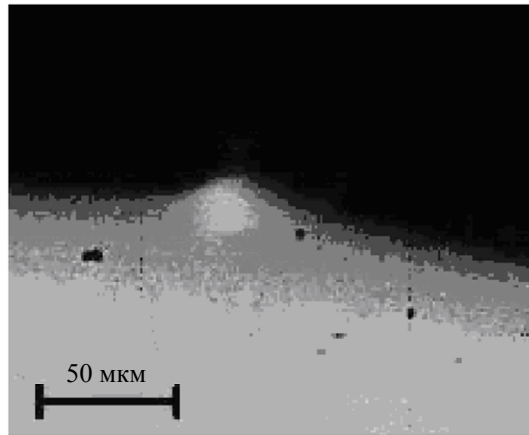


Рис. 2

3. Образование элемента цилиндрической/конической формы с закругленной вершиной, экспозиция 10 с (рис. 3).

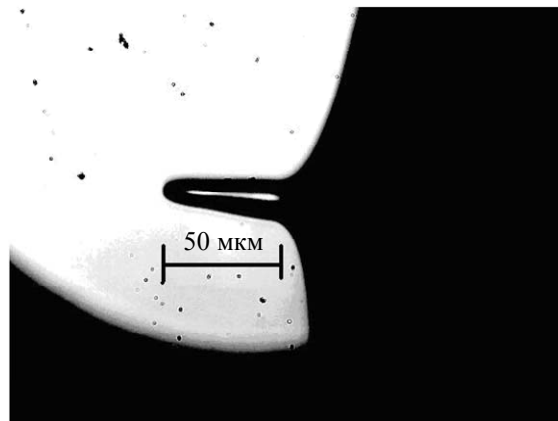


Рис. 3

4. Возможно образование структуры „перетяжка“, экспозиция 15 с (рис. 4). Возникновение подобной формы может быть объяснено тем, что в данной точке находится фокус линзы, образовавшейся на этапе 2.

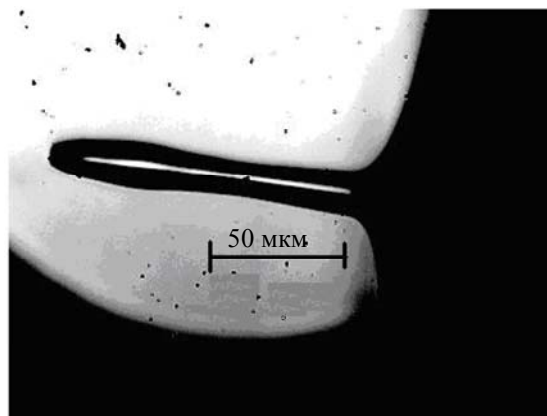


Рис. 4

5. При увеличении экспозиции происходит выравнивание профиля элемента. Опыты показали, что при достаточной экспозиции (45 с) эта форма (рис. 5) элемента является хорошо воспроизводимой (вероятность получения почти 100 %).

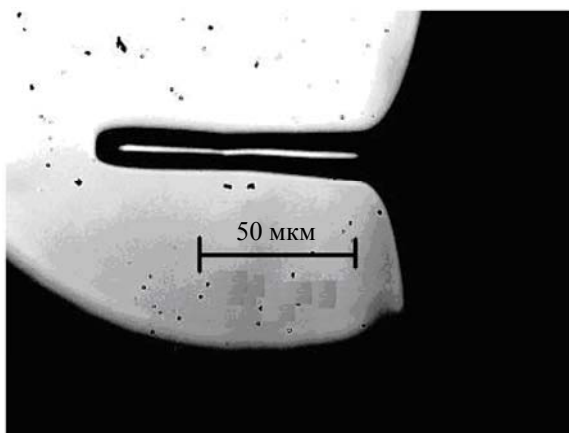


Рис. 5

Среди других особенностей процесса роста стоит отметить: отсутствие уширения элементов и увеличение радиуса кривизны микролинзы на конце элемента при большом времени облучения, высота элемента достигает высоты капли очень быстро за счет большой скорости полимеризации.

Во второй части исследования контролировалось качество микроэлементов. Схема эксперимента представлена на рис. 6. Сначала измерялась зависимость интенсивности излучения от расстояния между „чистым“ волоконным торцом и сканирующим волокном, соединенным с фотоприемником (рис. 6, а) далее — зависимость интенсивности от расстояния между сканирующим волокном и волокном с полимерным микроэлементом на торце (рис. 6, б). В качестве сканирующего использовалось волокно 9/125 в связи с практической важностью получения микроэлементов, обеспечивающих эффективное сопряжение одномодовых и многомодовых волокон.

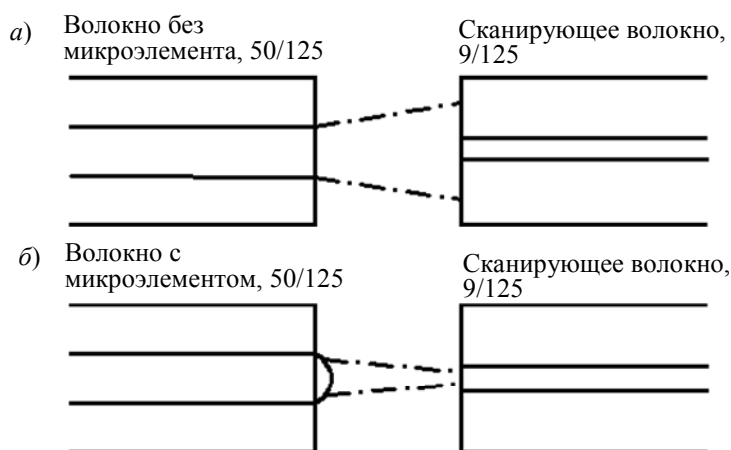


Рис. 6

На рис. 7 представлены полученные результаты измерений (зависимости силы тока фотоприемника, I , от расстояния между волокнами, l): 1 — полимерное образование на торце волокна отсутствует, 2 — при наличии полимерного образования. Кривая 2 имеет явно выраженный максимум, подтверждая то, что микроэлемент обладает фокусирующим действием, т.е. является микролинзой. Однако график показывает, что даже в точке максимума сила тока, а значит и интенсивность излучения, меньше, чем при соединении двух торцов встык.

Для выявления источника потерь был проведен следующий опыт: в волокно с микролинзой на конце вводилось лазерное излучение гелий-неонового лазера. Была получена картина, представленная на рис. 8. Сам элемент остается темным, зато наблюдаются существенные потери на границе полимер—кварц.

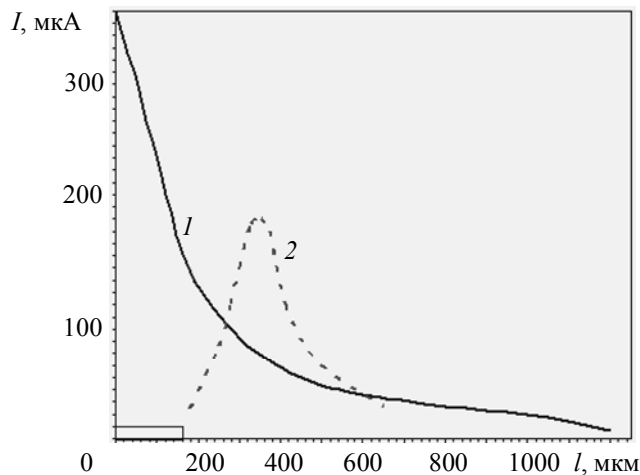


Рис. 7

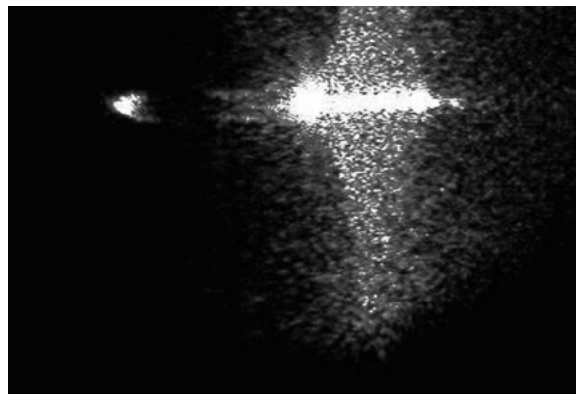


Рис. 8

Результаты. В ходе работы была изучена динамика роста/образования полимерных микроэлементов на торце оптического волокна. Одной из особенностей полученных образцов является то, что ширина всех элементов начиная с третьего этапа формирования приблизительно равна полуширине световедущей жилы. Это может быть объяснено следующим образом: после достижения порогового значения энергии процесс полимеризации протекает непрерывно и сопровождается плавным изменением показателя преломления, которое начинается после разрыва связей и образования свободных радикалов [5]. На рис. 9 приведена зависимость показателя преломления композиции n от экспозиции (E).

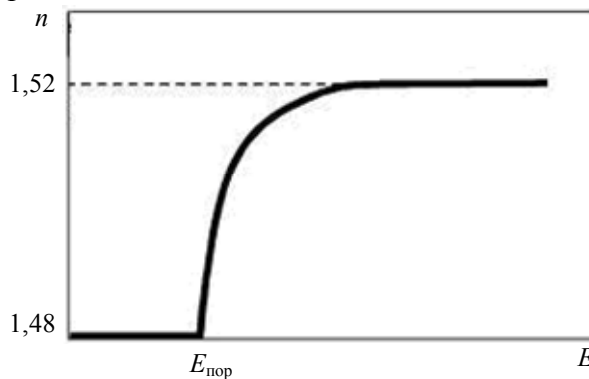


Рис. 9

Увеличение показателя преломления обусловлено увеличением общего числа связей в единице объема и более плотной упаковкой молекул. Для данного состава разница показателей преломления составляет 0,04 (1,48 для мономерной композиции и 1,52 — для полимера). В итоге наблюдается эффект самофокусировки света в среде, т.е. образование волновода, сердцевинкой которого является полимер, а оболочкой — мономерная смесь. Известно, что даже при полном внутреннем отражении свет выходит за границу вещества на расстояние, равное половине длины волны, и следовательно, можно было бы ожидать медленного роста элемента и в ширину. Однако этого не происходит, поскольку энергии вышедшего светового излучения недостаточно для выжигания кислорода, инициирования радикалов и начала полимеризации. Также направленному росту элемента способствует мономер с линейной структурой 2-carboxyethyl acrylate, присутствующий в композиции. Он содержит химически активные по

отношению к кварцу кислотные группы, что обеспечивает взаимодействие полимера с оптоволоконным торцом.

В ходе работы было установлено, что радиус кривизны формируемого микроэлемента увеличивается при увеличении экспозиции, рис. 3—5 иллюстрируют эту закономерность.

Исследования качества полученных элементов показали, что технология изготовления нуждается в доработке и оптимизации: потерь в самом микроэлементе не наблюдается, что подтверждает его волноводную структуру, зато имеются существенные потери на границе сопряжения микроэлемента и оптического волокна. Потери могут быть снижены за счет химической обработки торца, подбора мономерной композиции с показателем преломления, более близким по значению к показателю кварцевой сердцевины — 1,46. Также эффективным может оказаться изменение способа ввода излучения в волокно. Другой подход заключается в уменьшении размера мономерной капли и использовании минимального времени экспозиции, что позволит получить квазисферический элемент (см. второй этап формирования элемента).

Заключение. В работе исследованы процессы фотополимеризации композиции под действием света, выходящего из торца оптоволокна при нанесении композиции на торец, и проведено экспериментальное исследование фокусировки света, выходящего из торца оптоволокна сформированной микролинзой, и показано, что микролинза имеет длину фокуса около 400 мкм.

Показано, что наблюдаемые потери света в микроэлементе, сформированном по данному методу, определяются диаметром самоорганизованного фоконя и центральной жилы оптоволокна, потери в самом элементе практически отсутствуют.

Работа выполнена при поддержке проекта Рособразования 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 // Лазерные технологии. 2008. № 3. 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., Bachelotb R., Ecoffetc C., Fressengeasa N., Royerb P., Kugel G. End-of-fiber polymer tip: manufacturing and modeling // Synthetic Metals. 2002. N 127. P. 313—318.
6. Bachelot 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 // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1, № 1—2. С. 240—244.
8. Fokina M. I. Optical surface making by UV-curing of monomeric compositions in near field of coherent light source // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2007. Vol. 468. P. 385—394.
9. 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.
10. Fokina M. I., Kaporskiy L. N., Denisuk I. Yu. Nature of Microelements Self Writing in Fiber Tips in UV-Curable Composites // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2008. Vol. 497. P. 236—240.
11. Andrzejewska E. Photopolymerization kinetics of multifunctional monomers // Prog. Polym. Sci. 2001. Vol. 26. P. 605—665.

Сведения об авторах

- Мария Ивановна Фокина** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики нанторазмерных систем; ассистент; E-mail: mari2506@rambler.ru
- Нина Олеговна Собошук** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики нанторазмерных систем; инженер; E-mail: daedraazura@gmail.com
- Игорь Юрьевич Денисюк** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики нанторазмерных систем; заведующий кафедрой; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптики нанторазмерных систем

Поступила в редакцию
23.03.10 г.