

Разработка альтернативной конструкции волоконно-оптического зонда рамановской спектроскопии на основе оптических волокон с нанесенными прецизионными микроструктурными дефектами

А.В. Бурдин¹, Д.Н. Артемьев², А.С. Евтушенко¹, В.С. Казаков¹, И.А. Карцов¹,
М.Ю. Каргашов¹, Ю.Е. Литвинова²

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, ул. Льва Толстого 23, Самара, Россия, 443010

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. В работе предложена методика формирования прецизионных микролинз и фоконов на торцах кварцевых оптических волокон с предварительно записанными волоконными решетками Брэгга, представляющих собой альтернативную конструкцию волоконно-оптического зонда Рамановской спектроскопии, с помощью штатного комплекта полевого сварочного аппарата и его модифицированного соответствующим образом программного обеспечения. Приведены результаты экспериментальной апробации предложенной методики. Разработаны практические рекомендации по выбору установок параметров программ. Представлены результаты исследований зависимости геометрических параметров полученных волоконно-оптических элементов в зависимости от выбора установок программы сварочного аппарата – тока и времени подачи дуги.

1. Введение

На сегодняшний день диагностика с помощью Рамановской спектроскопии привлекает большое внимание из-за возможности неинвазивного анализа живых организмов [1]. Использование волоконных зондов для оптических биопсий обеспечивает ряд преимуществ как для пациента, так и для медицинских работников, поскольку оно может предотвратить ненужную резекцию ткани для диагностических целей. Особенно широкое применение Рамановская спектроскопия нашла в приложениях диагностики онкологических заболеваний [2]. Использование оптических волокон (ОВ) улучшает позиционирование и обеспечивает удобство сбора излучения по сравнению с распространением луча в свободном пространстве. При этом канал доставки лазерного излучения должен содержать узкополосный фильтр, чтобы гарантировать подавление Рамановского фона в возбуждающем световоде. Второй фильтр необходим для подавления релеевски рассеянного лазерного излучения, т.е. для фильтрации только Рамановского рассеяния в собирающих волокнах, так как упруго рассеянный свет возбуждающего лазера на несколько порядков более интенсивный, чем неупруго рассеянные сигналы Рамановского рассеяния. При этом подавляющее большинство известных решений

традиционно использует дорогостоящие тонкопленочные или голографические фильтры, которые, кроме того, требуют прецизионного позиционирования и соответствующей фиксации, что предъявляет высокие требования к элементам микромеханики и не может не сказаться на общем увеличении стоимости установки.

Другой проблемой использования описанных фильтров является внешний диаметр изготовленных на их основе зондов. Во многих медицинских применениях доступность ткани, представляющей интерес, ограничена анатомией, например, при колоноскопии или сердечно-сосудистой эндоскопии. Чтобы иметь возможность использовать Рамановские зонды в стандартных сердечно-сосудистых катетерах или рабочих каналах эндоскопа, их внешний диаметр не должен превышать 2 мм.

В качестве альтернативного решения указанной проблемы фильтрации предлагается использовать каскады волоконных решеток Брэгга (ВРБ), записанных непосредственно на ОВ Рамановского зонда. Для записи ВРБ в подавляющем большинстве случаев используются кварцевые ОВ традиционной конструкции. Однако сравнительно малый диаметр сердцевины световодов создает определенные трудности по сбору Рамановского рассеяния. Существенно повысить эффективность последнего предлагается за счет формирования на торцах отрезков ОВ с предварительно записанными ВРБ прецизионных микроструктурных волоконно-оптических дефектов, представляющих собой микролинзы заданной конфигурации.

В данной работе представлена методика формирования вышеуказанных микродефектов с помощью штатного комплекта полевого аппарата для сварки ОВ Ericsson FSU-975 [3] и его модифицированного соответствующим образом программного обеспечения. Приведены результаты экспериментальной апробации предложенной методики. Разработаны практические рекомендации по выбору установок параметров программ. Представлены результаты исследований зависимости геометрических параметров полученных волоконно-оптических элементов в зависимости от выбора установок программы сварочного аппарата – тока и времени подачи дуги.

2. Вопросы формирования микролинз заданной конфигурации на торце кварцевого волоконного световода

Как было отмечено выше, для решения задачи формирования микролинзы на торце отрезка кварцевого ОВ применялся комплект полевого сварочного аппарата Ericsson FSU-975. На первом этапе было предложено использовать штатную программу №9 [3], предполагающую одновременный нагрев и тяжение ОВ. В результате в зоне обжига осуществляется сужение световода вплоть до его разрыва на два отдельных «зауженных» световода. Затем выполняется повторный обжиг этих подготовленных ОВ, благодаря чему происходит сглаживание торцов и последующее нанесение полусферической микролинзы. В свою очередь, повторная принудительная сварка «зауженных» ОВ позволяет сформировать сферическую линзу. Пилотные образцы полученных полусферической и сферической линз, сформированные на торце стандартных одномодовых ОВ рек. ИТУ-Т GT.652 представлены на рис. 1(а) и 1(б), соответственно.

Отдельный интерес, с точки зрения применения в конструкции зонда Рамановской спектроскопии, представляет изготовление фоконов. В этом случае, на первом этапе на основе ранее разработанной методики нанесения одиночных прецизионных макроструктурных дефектов, подробно описанной в работах [4, 5], записывается «бочка» (рис. 2(а)). Данный дефект формируется непосредственно в процессе выполнения сварного соединения двух отрезков ОВ с последующей доводкой световодов «вручную» для формирования искомого дефекта непосредственно в процессе подачи дуги. Далее, по аналогии с микролинзой, осуществляется запуск программы №9 [3], в результате в зоне подачи дуги, совпадающей с местоположением бочки, осуществляется тяжение с последующим разрывом ОВ на два световода конической геометрии, благодаря наличию предварительно сформированной «бочке». Затем при необходимости осуществляется повторный обжиг торцов этих подготовленных ОВ, благодаря чему происходит сглаживание торца фокона, что фактически

соответствует процессу формирования микролинзы экстремально малого радиуса (рис. 2 (б) – (г)).

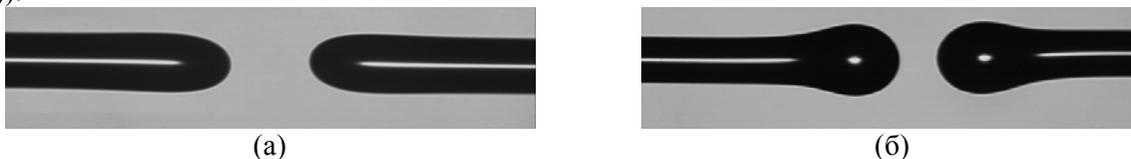


Рисунок 1. Пилотные образцы микролинз на торце одномодового ОВ рек. ITU-T G.652: (а) полусферическая линза; (б) сферическая линза.

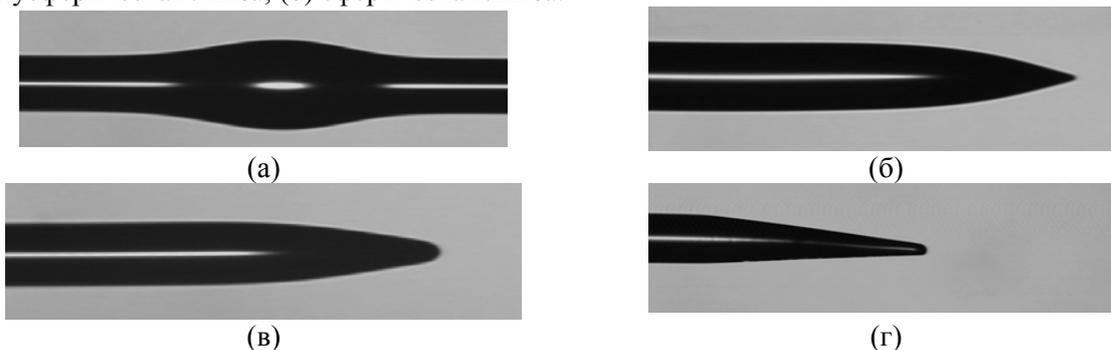


Рисунок 2. Пилотные образцы фоконов на торце кварцевого ОВ: (а) 1й этап нанесения «бочки»; (б) – (г) окончание 3го этапа: фоконы разной конфигурации.

Анализ полученных результатов демонстрирует потенциальные возможности использования предложенной методики для формирования микролинз на торцах кварцевых волоконных световодов с помощью штатного комплекта типового аппарата для сварки ОВ, в отличие от известных подходов, требующих применение специализированного лабораторного оборудования [6 – 8]. Вместе с тем, очевидно, что с точки зрения последующего практического приложения в измерительных схемах Рамановской спектроскопии, возникает задача изготовления таких волоконно-оптических с заданной конфигурацией, прецизионной геометрией и высокой повторяемостью их характеристик.

Вышесказанное требует проведения дополнительных исследований влияния выбора комбинации соответствующих установок программы сварки на геометрию микролинзы. Однако при этом возникает проблема корректного определения ее ключевого параметра – радиуса. Очевидным решением данной задачи является визуальная оценка данного параметра по сделанным в процессе сварки скриншотам и тепловым изображениям зоны обжига, снимаемым с видеовыхода сварочного аппарата. Однако вопрос перехода от относительных значений геометрических параметров, нормированных на диаметр оболочки ОВ, к фактическим остается открытым: известно, что для многомодовых ОВ отклонение диаметра оболочки от номинального значения 125 мкм может достигать до 2 мкм включительно [9, 10]. В результате на первом этапе потребовалось проведение дополнительной разработки методики оценивания геометрических параметров ОВ по скриншотам дисплея сварочного аппарата.

3. Разработка методики оценивания геометрических параметров ОВ на основе анализа изображения, выводимого на дисплей сварочного аппарата

Для решения сформулированной выше задачи было подготовлено 12 отрезков промышленных образцов многомодовых ОВ категории OM2 длиной не менее 0,5 м каждый и далее с помощью анализатора ОВ EXFO NR-9200HR Optical Fiber Analyzer проведены измерения профиля показателя преломления, протоколы которых включают в себя непосредственно массивы данных радиальной координаты в условных сечениях «X» и «Y». Таким образом, значение радиальной координаты, локализованное по протоколу на границе раздела оболочка/иммерсионная жидкость, принималось за действительное в левой или правой части заданного сечения (рис. 3).

Для последующей идентификации концы тестируемых отрезков ОВ после погружения в кювету анализатора EXFO соответствующим образом маркировались. Затем этот же отмеченный конец ОВ закладывался в каретку сварочного аппарата Ericsson FSU-975. Далее цифровое изображение торца ОВ с дисплея через видеовыход выводилось в ПЭВМ. После соответствующей обработки в графическом редакторе проводилась оценка искомого диаметра ОВ по оболочке уже непосредственно в пикселах (рис. 4). Данная процедура повторялась для каждого из 12 образцов. Таким образом, в результате сопоставления количества пикселей изображения ОВ и действительного значения диаметра ОВ по оболочке, согласно протоколу измерения, после проведения соответствующего статистического анализа был получено эмпирическое значение поправочного коэффициента, значение которого составило 1.529 мкм / пиксел.

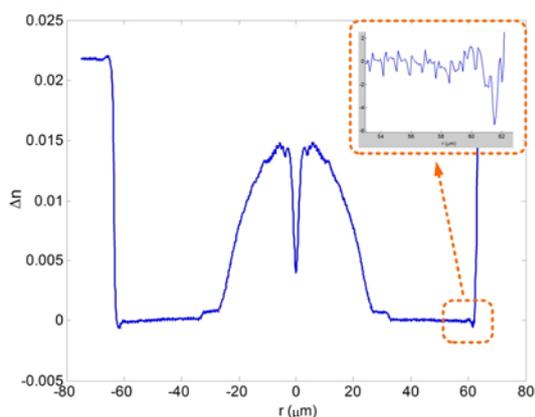


Рисунок 3. Протокол измерения профиля показателя преломления тестируемого отрезка образца ОВ №А04-02: условное сечение «Х», диаметр оболочки 123.44 мкм.

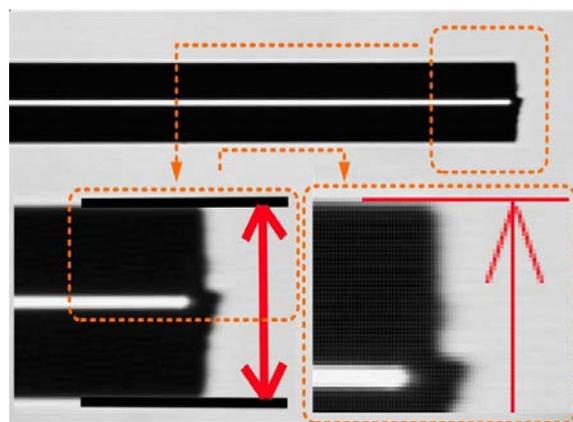


Рисунок 4. Визуальная оценки геометрических параметров ОВ: условное сечение «Х» после обработки в графическом редакторе – 81 пиксел.

Это позволило далее непосредственно перейти к исследованию влияния установок программного обеспечения на геометрические параметры формируемой микролинзы. Так, например, радиус полусферической микролинзы, представленной на рис. 1(а) составил 53.5 мкм, для сферической рис. 1(б) – 96.0 мкм, а фокона рис. 2(г) – 30.0 мкм.

4. Экспериментальные исследования зависимости радиуса микролинзы заданной конфигурации от установок программного обеспечения сварочного аппарата

Как было отмечено выше, для формирования полусферических и сферических линз используется программа №9. Согласно [3], именно на втором этапе подачи дуги осуществляется процедура вытяжки зоны обжига ОВ. Поэтому можно предположить, что время подачи дуги «2» (Fusion Time 2) и ток дуги «2» (Fusion Current 2) в основном будут определять геометрию «перетяжки». По умолчанию значения указанных параметров составляют 7 с и 12 мА, соответственно.

На первом этапе исследовалось влияние установки тока дуги «2» при фиксированном времени сварки «2» 7 с на радиус полусферической линзы. Значение указанного параметра варьировалось, начиная от 12 до 19 мА, включительно. Так же, как и в случае пилотных образцов, линза формировалась на торце стандартного одномодового ОВ рек. ITU-T G.652. По окончании подачи дуги с дисплея сварочного аппарата снималось изображение зоны обжига, которое через видеовыход выводилось в ПЭВМ, после чего на основе представленной в предыдущем п.п.3 методики оценивания геометрических параметров ОВ, осуществлялось определение искомого значения радиуса линзы. На рис. 5(а) представлена полученная в результате сопоставления данных диаграмма зависимости радиуса полусферической линзы от тока дуги «2».

На следующем этапе варьировалось время подачи дуги «2» при фиксированном токе дуги «2» 13 мА. В данном случае значение указанного параметра варьировалось в диапазоне от 6 до 13 с. Диаграмма зависимости радиуса полусферической линзы от времени подачи дуги «2» приведена на рис. 5(б).

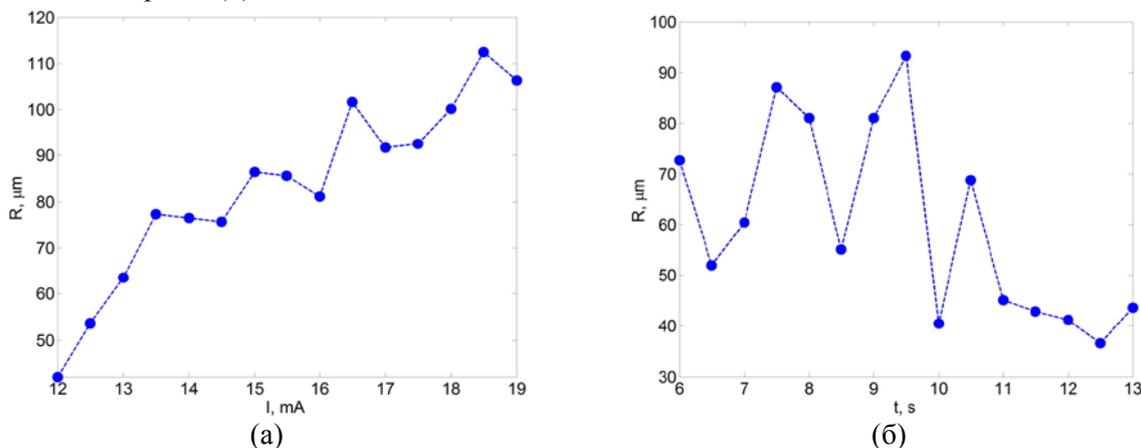


Рисунок 5. Результаты экспериментальных исследований влияния установок параметров ПО сварочного аппарата на радиус полусферической микролинзы: (а) ток дуги; (б) время подачи дуги.

Сопоставление полученных в результате проведенной серии тестов данных позволяет выявить общий тренд увеличения радиуса полусферической линзы с увеличением тока дуги «2», а сравнение с диаграммой зависимости радиуса линзы от времени подачи дуги – сделать предположение, что основное влияние в данном случае оказывает непосредственно выбор тока дуги.

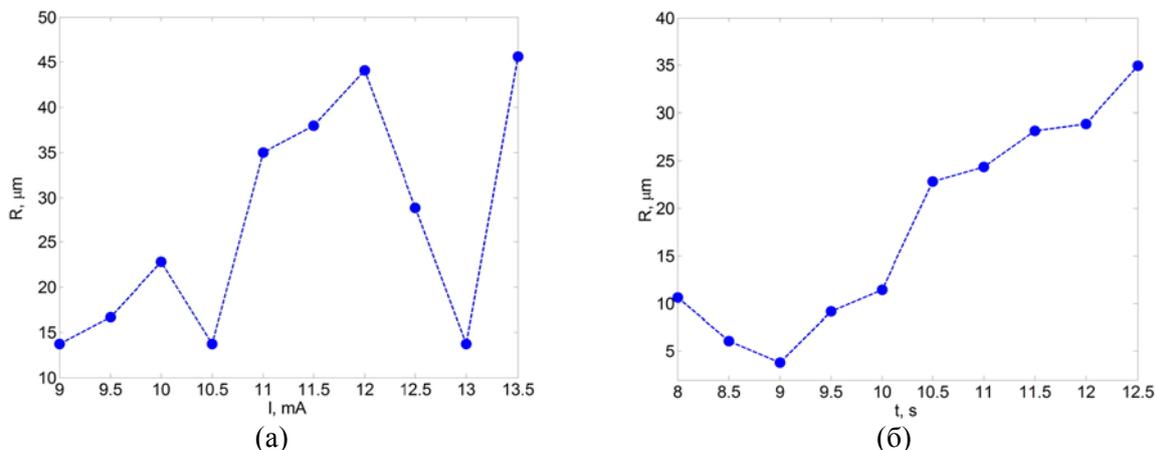


Рисунок 6. Результаты экспериментальных исследований влияния установок параметров ПО сварочного аппарата на радиус фокона: (а) ток дуги; (б) время подачи дуги.

Аналогичные исследования были проведены для фоконов. Здесь после формирования бочки и переходе к программе №9 ток дуги «2» варьировался от 9 до 13.5 мА при фиксированном времени подачи дуги «2» 12 с, в то время как для следующей серии тестов время подачи дуги менялось от 8 до 12.5 с при установленном значении тока дуги 11 мА. Результаты сопоставления полученных данных представлены в виде соответствующих диаграмм на рис. 6(а) и 6(б). Здесь, напротив, сопоставление полученных в результате проведенной серии тестов данных демонстрирует общий тренд увеличения радиуса фокона с увеличением времени подачи дуги «2», а последующее сравнение с диаграммой зависимости радиуса фокона от тока дуги «2» позволяет сделать предположение, что основное влияние в данном случае оказывает непосредственно выбор времени подачи дуги «2».

Анализ полученных результатов показывает, что даже для такой достаточно ограниченной выборки исследованных значений уже возможно определить искомую комбинацию перечисленных параметров программы сварочного аппарата, обеспечивающих формирование полусферической микролинзы на торце ОВ с радиусом из диапазона значений 40...100 мкм, либо, напротив, фокона радиусом 4...45 мкм.

5. Приложения

Предложена методика формирования прецизионных микролинз заданной конфигурации на торце кварцевых волоконных световодов с помощью штатного комплекта полевого сварочного аппарата Ericsson FSU-975 и его модифицированного соответствующим образом программного обеспечения. Разработана оригинальная методика оценивания геометрических параметров микролинзы по результатам анализа видеоизображения зоны обжига, сделанной по окончании процесса формирования линзы на торце ОВ и выведенного на дисплей сварочного аппарата. Проведена серия экспериментальных исследований влияния установок программного обеспечения аппарата – тока дуги «2» и времени подачи дуги «2» на ключевой геометрический параметр микролинзы – ее радиус. Это далее позволило разработать практические рекомендации по коррекции предустановленных параметров, в частности, времени подачи и тока дуги «2» для формирования полусферической микролинзы на торце ОВ с радиусом из диапазона значений 40...100 мкм, либо, напротив, фокона радиусом 4...45 мкм.

6. Литература

- [1] Utzinger, U. Fiber optic probes for biomedical optical spectroscopy / U. Utzinger, R.R. Richards-Kortum // *Journal of Biomedical Optics*. – 2003. – Vol. 8(1). – P. 121-147. DOI: 10.1117/1.1528207.
- [2] Bratchenko, I.A. Combined Raman and autofluorescence ex vivo diagnostics of skin cancer in near-infrared and visible regions / I.A. Bratchenko, D.N. Artemyev, O.O. Myakinin, Y.A. Khristoforova, A.A. Moryatov, S.V. Kozlov, V.P. Zakharov // *Journal of Biomedical Optics*. – 2017. – 22(2). – P. 027005. DOI: 10.1117/1.jbo.22.2.027005.
- [3] Ericsson FSU-975. Руководство пользователя: Пер. с англ. – Ericsson, 2001. – 76 с.
- [4] Андреев, В.А. Разработка методики формирования прецизионных макродефектов в структуре кварцевых волоконных световодов / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, А.А. Василец, С.А. Гаврюшин, А.С. Евтушенко, В.С. Казаков, О.Г. Морозов, Н.Л. Севрук, Е.Д. Соколов // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2017. – №1. – С. 18-29. DOI: 10.18469/ikt.2017.15.1.03.
- [5] Evtushenko, A.S. Technique for writing of fiber Bragg gratings over or near preliminary formed macro-structure defects in silica optical fibers / A.S. Evtushenko, L.M. Faskhutdinov, A.M. Kafarova, V.S. Kazakov, A.A. Kuznetsov, A.Yu. Minaeva, N.L. Sevruk, I.I. Nureev, A.A. Vasilets, V.A. Andreev, O.G. Morozov, V.A. Burdin, A.V. Bourdine // *Proceedings of SPIE*. – 2017. – Vol. 10342. – P. 103420X-1-103420X-11. DOI: 10.1117/12.2270786.
- [6] Петров, А.А. Применение волоконных микролинз для повышения эффективности оптических межсоединений / А.А. Петров, В.П. Вейко // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2005. – Т. 5, № 4(20). – С. 68-72.
- [7] Вейко, В.П. Экспериментальная установка с обратной связью для лазерной вытяжки нанозондов / В.П. Вейко, В.З. Зыонг, Е.Б. Яковлев // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2005. – Т.5, №4(20). – С. 73-77.
- [8] Вейко, В.П. Оптические характеристики микролинз, полученных методом лазерно-индуцированной аморфизации стеклокерамик / В.П. Вейко, Б.Ю. Новиков // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2008. – Т. 8, №3(48). – С. 68-72.
- [9] Листвин, А.В. Оптические волокна для линий связи / А.В. Листвин, В.Н. Листвин, Д.В. Швырков. – М.: ЛЕСАРарт, 2003. – 288 с.
- [10] Семенов, А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / А.Б. Семенов. – М.: Академия АйТи; ДМК Пресс, 2007. – 632 с.

Development of alternative fiber optic Raman probes based on optical fibers with written precision micro-structure defects

A.V. Bourdine¹, D.N. Artemyev², A.S. Evtushenko¹, V.S. Kazakov¹, I.A. Karptsov¹, M.Yu. Kartashov¹, J.E. Litvinova²

¹Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Lev Tolstoy str. 23, Samara, Russia, 443010

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. This work is devoted to development of alternative fiber optic Raman probes; it consists of silica optical fibers with integrated Bragg gratings and formed precision micro-lens at the core end. We present a method for forming micro-lens by commercial field fusion splicer with its modified software. Some results of its experimental approbation are demonstrated. We carried out experimental researches of software settings influence: fusion time and fusion current on micro-lens radius.

Keywords: fiber optic Raman probe, fiber Bragg grating, micro-lens formed at optical fiber core end.