

**ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ****Изготовление микроструктурированных волоконных световодов методом вытяжки из заготовок с запаянным верхним торцом****А.Н.Денисов, А.Ф.Косолапов, А.К.Сенаторов, П.Е.Пальцев, С.Л.Семенов**

*Приведены результаты теоретического анализа и серии экспериментов по вытяжке волоконных микроструктурированных световодов (МС) из заготовок с запаянным верхним торцом. Показана важность поддержания неизменной температуры верхней части заготовки для получения длинных МС со стабильными параметрами. Предложена и реализована методика дополнительного регулируемого нагрева верхней части заготовки, позволяющая изготавливать длинные МС как со стабильными, так и с меняющимися по длине световода параметрами. Продемонстрирована относительная простота изготовления этим методом МС с отверстиями разных размеров.*

**Ключевые слова:** микроструктурированные волоконные световоды, фотонно-кристаллические световоды, изготовление волоконных световодов.

**1. Введение**

Волоконные микроструктурированные световоды (МС), называемые также фотонно-кристаллическими, становятся неотъемлемой частью волоконных лазеров благодаря своим уникальным высококонтрастным свойствам. Эти световоды применяются для компенсации материальной дисперсии в спектральной области вблизи 1 мкм, для генерации суперконтинуума и эффективного четырехволнового смешения в видимом и ИК спектральных диапазонах [1–6]. Перечисленные эффекты в значительной степени зависят от дисперсионных свойств МС, которые, в свою очередь, определяются размерами, положением и продольной однородностью отверстий в этих световодах. Поэтому важным моментом при вытяжке МС является сохранение либо контролируемая трансформация их структурных параметров, определяемых параметрами заготовки.

Существуют несколько основных методов вытяжки МС. Один из них – это вытяжка из заготовок с открытыми в атмосферу отверстиями [7–15]. Однако в процессе вытяжки сделанные в заготовке отверстия уменьшаются под действием сил поверхностного натяжения вплоть до полного их закрытия (схлопывания). Для того чтобы избежать схлопывания, необходимо использовать низкую температуру вытяжки, высокую скорость подачи заготовки, большой диаметр отверстий или любую комбинацию этих условий [7]. К сожалению, вытяжка в таких условиях приводит к проблемам с прочностью МС и воспроизводимостью их параметров, а также затрудняет изготовление МС с тонкими перемычками между отверстиями.

Для предотвращения схлопывания отверстий при вытяжке МС широко используется подача в них газа (обычно аргона, кислорода или азота) под внешним давлением, несколько большим атмосферного, что позволяет компенсировать силы поверхностного натяжения [14–21]. Этот метод дает возможность работать при более высоких температурах и скоростях вытяжки, обеспечивающих достаточную прочность получаемых МС. Однако в этом случае окончательный диаметр отверстий в световоде определяется не только исходным диаметром отверстий в заготовке, но и температурой и скоростью вытяжки, что приводит к низкой стабильности структурных и, следовательно, физических параметров (например, дисперсии) МС. Кроме того, если в МС нужны отверстия разного диаметра, необходимо, чтобы в них подавался газ при разном давлении.

В настоящей работе мы рассматриваем альтернативный метод вытяжки МС – из заготовок с запаянным верхним торцом [22, 23]. Отверстия в нижнем торце заготовки в начале процесса открыты, т. е. находятся при атмосферном давлении. В этом случае после схлопывания отверстий в начальный момент вытяжки по мере вытягивания световода и, соответственно, уменьшения длины заготовки происходит медленное повышение внутреннего давления газа, остающегося внутри отверстий заготовки. В конечном итоге это приводит к появлению отверстий в получаемом МС. Однако описанные в [22] МС имеют практически одинаковые соотношения между размерами отверстий и расстояниями между ними как в заготовке, так и в световоде, чем они существенно отличаются от МС, полученных нами с использованием предлагаемого метода [24, 25]. Зависимость степени геометрического преобразования структуры от длины МС в [22] также не определена. Таким образом, существующая неопределенность в геометрической трансформации структуры не позволяет контролировать и управлять структурными параметрами МС, изготовленных этим методом.

Целями настоящей работы являются:

– Проведение теоретического анализа процесса вытяжки МС из заготовок с запаянным верхним торцом и

**А.Н.Денисов, А.Ф.Косолапов, А.К.Сенаторов, С.Л.Семенов.** Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: denisov@fo.gpi.ru

**П.Е.Пальцев.** Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141707 Долгопрудный, Институтский пер., 9

Поступила в редакцию 23 сентября 2016 г., после доработки – 12 октября 2016 г.

определение основных факторов, влияющих на трансформацию геометрической структуры МС в этом процессе.

– Вытяжка различных вариантов МС из заготовок с запаянным верхним торцом и сравнение полученных результатов с теоретическими оценками.

– Определение необходимых условий для изготовления длинных МС со стабильными структурными и, соответственно, физическими параметрами.

– Экспериментальная проверка возможности контроля и управления параметрами вытягиваемых МС с помощью дополнительного нагрева верхней части заготовки.

## 2. Теоретический анализ

Рассмотрим стационарный, т.е. установившийся процесс. В настоящей работе мы ограничимся процессом вытяжки МС из кварцевого стекла, хотя большой интерес представляют также МС из полимеров [26] и некварцевых стекол [27, 28]. При рассмотрении процесса вытяжки таких МС следует учитывать лишь различия в их соответствующих параметрах.

Без ограничения общности рассмотрим для простоты процесс вытяжки кварцевой трубки с исходными внешним ( $D_1$ ) и внутренним ( $d_1$ ) диаметрами в капилляр с внешним диаметром  $D_2$  и отверстием диаметром  $d_2$  (рис.1). Большая часть выводов, сделанных ниже, применима также к более общим случаям. Пусть скорость подачи заготовки в печь есть  $v_1$ , а скорость вытяжки капилляра –  $v_2$ . Верхний торец заготовки запаян, и часть заготовки от этого торца до входа в печь находится при температуре  $T_1$  и давлении  $P_1$ . Температура в центре печи  $T_2$ , давление  $P_2$ .

Из условия непрерывности течения кварцевого стекла при вытяжке имеем

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D_2^2 - d_2^2}{D_1^2 - d_1^2}, \quad (1)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – площади поперечного сечения кварцевого стекла в заготовке и в капилляре соответственно.

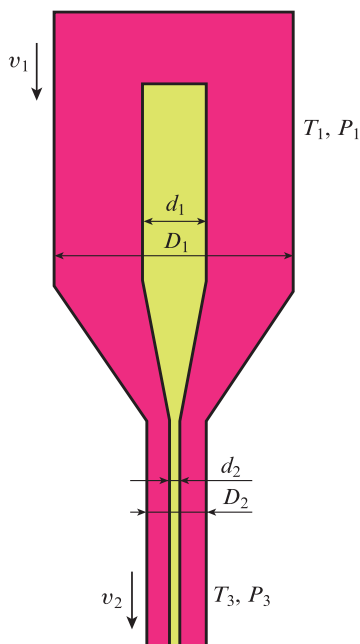


Рис.1. Схема вытяжки капилляра из заготовки с запаянным верхним торцом.

Можно показать, что при типичных параметрах вытяжки МС давление газа внутри отверстий заготовки  $P_1$  успевает выравниваться по всей ее длине ( $P_1 = P_2$ ). Рассмотрим сначала простой случай достаточно малого отверстия в капилляре, когда поток газа относительно его стенок незначителен. В стационарном случае из условия сохранения массы газа следует:

$$\rho_1 s_1 v_1 = \rho_2 s_2 v_2, \quad (2)$$

где  $s_1$  и  $s_2$  – площади поперечного сечения воздушных отверстий в заготовке и в капилляре соответственно;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности газа в отверстиях в верхней части заготовки и в области перетяжки соответственно. Принимая во внимание уравнение состояния идеального газа и постоянство давления газа по длине заготовки, получаем

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{v_1 T_2}{v_2 T_1}. \quad (3)$$

С учетом (1)

$$\frac{s_2}{S_2} = \frac{s_1 T_2}{S_1 T_1} = \frac{s_1}{S_1} k. \quad (4)$$

Здесь параметр  $k$  отражает изменение (увеличение) относительной площади отверстий в МС по сравнению с их площадью в заготовке. Для случая  $n$  одинаковых отверстий выражение (4) приобретает вид

$$\frac{d_2^2}{D_2^2 - nd_2^2} = \frac{d_1^2}{D_1^2 - nd_1^2} \frac{T_2}{T_1}. \quad (5)$$

В типичном случае для кварцевого стекла  $T_1 = 300$  К и  $T_2 = 2100$  К. Тогда для достаточно малых отверстий в заготовке и небольшого их числа ( $\sqrt{n} d_1 \ll D_1$ , т.е. общая площадь воздушных отверстий много меньше площади заготовки, что соответствует реальной ситуации) получаем относительную величину их линейного «раздувания» в световоде:  $(d_2/D_2)/(d_1/D_1) = \sqrt{T_2/T_1} \approx 2.65$ . Это существенно отличается от значения, приведенного в [22] ( $\sim 1.05$ ). Отсутствие детальной информации о режиме вытяжки МС, использованного в [22], позволяет лишь предположить, что полученные там МС соответствовали, возможно, ситуации, когда запаянные торцы капилляров находились близко к центру печи, так что  $T_2 - T_1 \sim 200$  К.

Одним из самых широко используемых структурных параметров, характеризующих МС, является отношение диаметра отверстий  $d_2$  к расстоянию между их центрами  $\Lambda_2$ :  $d_2/\Lambda_2$ . В частном случае малой площади воздушных отверстий по сравнению с площадью кварцевого стекла ( $s_1 \ll S_1$ ), нескольких (или многих) одинаковых отверстий с расстоянием между ними  $\Lambda_1$  и с учетом  $\Lambda_1/D_1 \approx \Lambda_2/D_2$  (сохранение подобия геометрической структуры при вытяжке) выражение (5) можно привести к следующему виду:

$$\frac{d_2}{\Lambda_2} = \frac{d_1}{\Lambda_1} \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}. \quad (6)$$

При  $T_1 = 300$  К и  $T_2 = 2100$  К имеем  $d_2/\Lambda_2 \approx (d_1/\Lambda_1) \cdot 2.65$ . Поскольку в вытянутом волокне диаметр отверстий не может быть больше расстояния между ними, должно выполняться соотношение  $d_2/\Lambda_2 < 1$ , и тогда при изготовлении заготовки следует обеспечить выполнение условия

$d_1/\Lambda_1 < 1/2.65 \approx 0.38$ . В противном случае, при  $d_1 > 0.38\Lambda_1$ , в процессе вытяжки МС соседние отверстия будут влиять друг на друга и их форма будет меняться, но соотношение (4) останется в силе. Трансформация формы отверстий также может представлять определенный интерес, но решить эту задачу можно только путем численного математического моделирования [29, 30], что выходит за рамки настоящей работы.

Таким образом, в соответствии с (4) можно заключить, что раздувание отверстий будет постоянным и стабильным, пока верхняя часть заготовки (от запаянного торца до входа в печь) будет находиться при постоянной температуре, т. е. до тех пор, пока верхний торец заготовки не войдет в печь.

Стоит отметить, что в случае заготовки с отверстиями разного диаметра ( $d_{1i}$ , где  $i$  – группа отверстий определенного размера) выражение (5) приобретает следующий вид:

$$\frac{d_{2i}^2}{D_2^2 - \sum_j n_j d_{2j}^2} = \frac{d_{1i}^2}{D_1^2 - \sum_j n_j d_{1j}^2} \frac{T_2}{T_1}. \quad (7)$$

Это выражение, как и (5), справедливо в случае, когда соседние отверстия в заготовке отстоят достаточно далеко друг от друга, так что в процессе вытяжки МС они не взаимодействуют и их форма не меняется.

Как следует из (7), если общая площадь воздушных отверстий много меньше площади заготовки, относительные величины раздувания отверстий разного размера практически равны и в общем случае их можно точно учесть. Это позволяет достаточно легко (нет необходимости подавать в отверстия разного диаметра газ с разным давлением) изготавливать МС с отверстиями различного диаметра.

Некоторое уточнение приведенных выше соотношений, в частности выражения (4), требуется при достаточно больших отверстиях в МС. В этом случае необходимо учитывать охлаждение МС после вытяжки до температуры  $T_3$  (около 300 К) и соответствующее уменьшение давления газа внутри вытянутого МС (до  $P_3$ ), что приводит к образованию потока газа  $Q$  из заготовки в световод через отверстие диаметром  $d_2$ . Поток  $Q$  определяется из уравнения Пуазейля [31]:

$$Q = \frac{\pi d_2^4}{128\eta} \frac{P_2 - P_3}{L}, \quad (8)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость газа;  $L$  – длина, на которой вытянутый МС остывает до температуры  $T_3$ . В результате раздувание отверстия несколько уменьшается.

Оценим это уменьшение в случае вытяжки капилляра. Для этого добавим в правую часть выражения (2) массовый поток газа  $Q\rho_2$ ; тогда выражение (5) примет следующий вид:

$$\frac{d_2^2}{D_2^2 - d_2^2} = \frac{d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} k, \quad (9)$$

где

$$k = \frac{T_2}{T_1} \left[ 1 + \frac{d_2^2}{32\eta L v_2} (P_2 - P_3) \right]^{-1}. \quad (10)$$

Таким образом, величина раздувания достаточно больших отверстий в МС будет меньше, причем степень этого

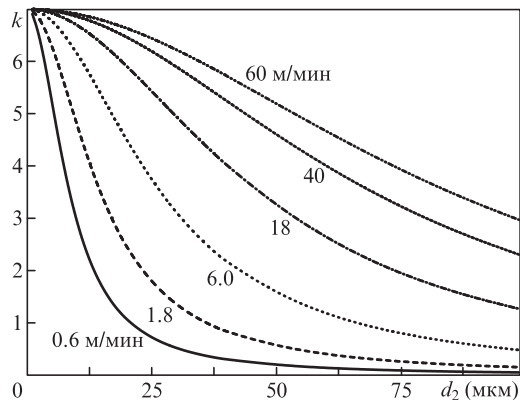


Рис.2. Зависимости параметра  $k$  от диаметра отверстия  $d_2$  для скоростей вытяжки  $v_2$  в диапазоне 0.6–60 м/мин.

уменьшения определяется размером отверстий, скоростью вытяжки МС, вязкостью газа в заготовке и геометрическими параметрами вытяжной установки (длиной  $L$ , на которой МС остывает до температуры  $T_3$ ). Оценим изменение параметра  $k$  при вариации диаметра отверстия  $d_2$  от 1 до 100 мкм и скорости вытяжки МС  $v_2$  от 0.6 до 60 м/мин при длине  $L = 0.25$  м, разности давлений  $P_2 - P_3 = 1.02$  атм и вязкости аргона  $\eta = 8.97 \times 10^{-4}$  пуаз (2100 К) [32] (рис.2). Как видно из рисунка, при  $d_2 = 50$  мкм и  $v_2 = 18$  м/мин (близкой к типичной для кварцевых МС) параметр  $k$  уменьшается примерно в два раза по сравнению с исходным значением.

### 3. Результаты экспериментов

Для проверки результатов теоретических расчетов мы изготовили несколько МС из разных заготовок.

#### 3.1. Вытяжка капилляра

Капилляр был вытянут из кварцевой трубки диаметром  $D_1 = 6.2$  мм с внутренним отверстием диаметром  $d_1 = 4.4$  мм. Скорость вытяжки  $v_2 = 40$  м/мин, скорость подачи заготовки  $v_1 = 10^{-2}$  м/мин. В процессе вытяжки измерялся наружный диаметр капилляра  $D_2$ , после чего с использованием выражения (1) определялся его внутренний диаметр  $d_2$ , затем, следуя (9), – параметр  $k$ . На рис.3,а показано изменение  $k$  по мере опускания заготовки в печь. Отсчет положения  $l$  запаянного торца заготовки производится относительно его положения в момент начала вытяжки. Первый участок изменения  $l$  (область 1) соответствует процессу установления раздувания отверстия в капилляре. В начале вытяжки при нагреве заготовки до температуры  $T_2$  отверстие схлопывается под действием сил поверхностного натяжения. Однако затем в процессе вытяжки длина заготовки и, следовательно, объем газа в отверстии уменьшаются, приводя к росту давления в нем. Это продолжается до тех пор, пока давление не преодолеет поверхностное натяжение, что приводит к появлению отверстия. Первоначально отверстие очень мало, поэтому убыль газа из его объема в заготовке незначительна, давление в нем продолжает расти и отверстие в капилляре увеличивается. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не установится равновесие, определяемое выражением (2).

Затем устанавливается стационарное состояние (область 2), когда давление газа в отверстии, диаметры ка-



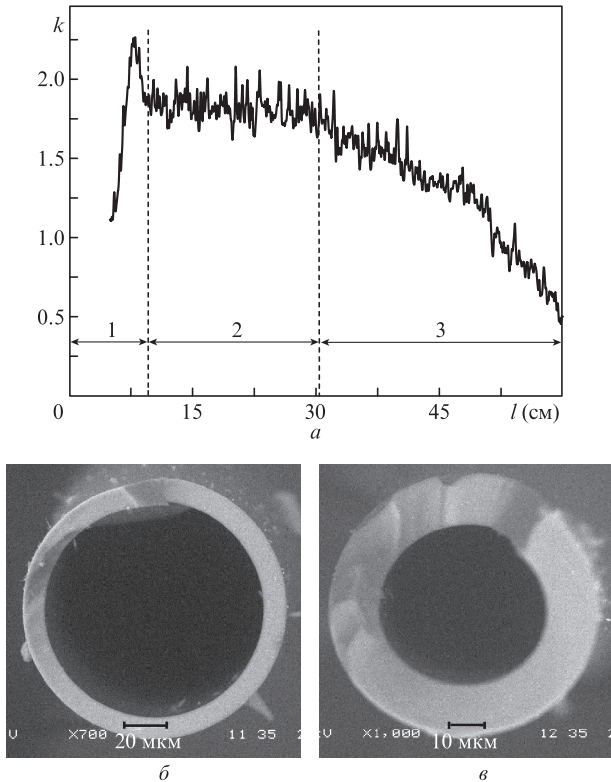


Рис.3. Зависимость параметра  $k$  от положения  $l$  запаянного торца заготовки в процессе вытяжки капилляра (а) и электронные микрофотографии поперечного сечения вытянутого капилляра для областей 2 ( $l = 14$  см) (б) и 3 ( $l = 59$  см) (в).

пилляра  $D_2$  и отверстия в нем  $d_2$  остаются постоянными, а следовательно, параметр  $k$  также стабилен. Для этой области  $D_2 = 122$  мкм и  $d_2 = 99$  мкм (рис.3,б), что позволяет с помощью (10) найти значение параметра  $k$ , составившее  $\sim 2$  (см. рис.2). Таким образом, измеренное значение  $k$  достаточно хорошо совпадает с рассчитанным, причем в данном случае важно учитывать достаточно большой размер  $d_2$  капилляра.

Постоянство геометрии капилляра сохраняется до тех пор, пока сохраняется постоянство температуры  $T_1$  верхней части заготовки. Когда же запаянный торец приближается к печи и пересекает ее верхний край ( $l = 30$  см), начинается резкое повышение температуры  $T_1$  (область 3). Это вызывает согласно (10) соответствующее уменьшению параметра  $k$ . На рис.3,в приведена фотография поперечного сечения вытянутого капилляра для  $l = 59$  см.

### 3.2. Вытяжка МС с шестью отверстиями

Заготовка изготавливалась методом высверливания отверстий в монолитном блоке кварцевого стекла. Затем она перетягивалась для уменьшения диаметра и на нее нахлопывалась кварцевая трубка с целью увеличения длины МС при обеспечении нужного размера сердцевины. Скорость вытяжки  $v_2$  составляла около 20 м/мин, ее точное значение задавалось следящей системой, контролирующей внешний диаметр МС ( $D_2 = 125$  мкм). Температура вытяжки  $T_2 = 2113$  К. На рис.4,а–г приведены изображения поперечного сечения вытянутого МС, соответствующие разным положениям  $l$  запаянного торца заготовки, сделанные с помощью электронного микроскопа при одном и том же увеличении. На рис.4,д приведена фото-

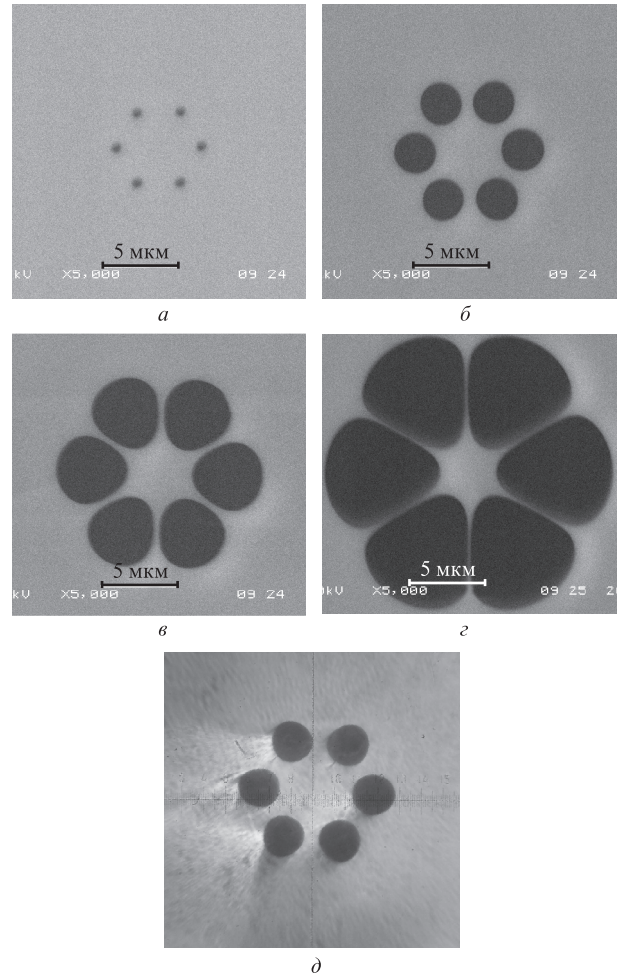


Рис.4. Микрофотографии поперечного сечения вытянутого МС с шестью отверстиями при  $l = 6$  (а), 12 (б), 14 (в) и 16 см (г), а также фотография поперечного сечения заготовки, сделанная с помощью оптического микроскопа (д).

графия поперечного сечения заготовки, сделанная с помощью оптического микроскопа.

Поскольку заготовка имела относительно большие отверстия ( $d_1 \approx 0.7\Lambda_1$ ), их форма начала изменяться, когда раздувание превысило некоторую пороговую величину (рис.4,в,г). Отметим также, что для поперечного сечения МС на рис.4,а отношение  $d_2/\Lambda_2$  много меньше  $d_1/\Lambda_1$ . Следовательно, это изображение МС соответствует моменту появления отверстия в результате роста давления газа, преодолевающего поверхностное натяжение.

На рис.5 представлены измеренные зависимости внешнего диаметра структуры  $D_{str}$ , образованной шестью отверстиями, диаметра сердцевины  $D_{core}$  и параметра  $k$  от положения запаянного торца заготовки. Как и в случае вытяжки капилляра, процесс изменения  $l$  можно условно разделить на три этапа. Сначала происходит установление раздувания отверстий в МС, причем на участке длиной около 6 см отверстия отсутствуют из-за их схлопывания в начальный момент вытяжки. Затем при  $l = 16$  см устанавливается стационарное состояние раздувания, при котором давление и диаметр отверстий далее не должны изменяться. Однако для данного МС это не совсем так: раздувание отверстий в волокне плавно уменьшается, что, по-видимому, обусловлено нагревом заготовки под действием ИК излучения, направленного со стороны печи, поскольку в сечении заготовки преобладает кварцевое

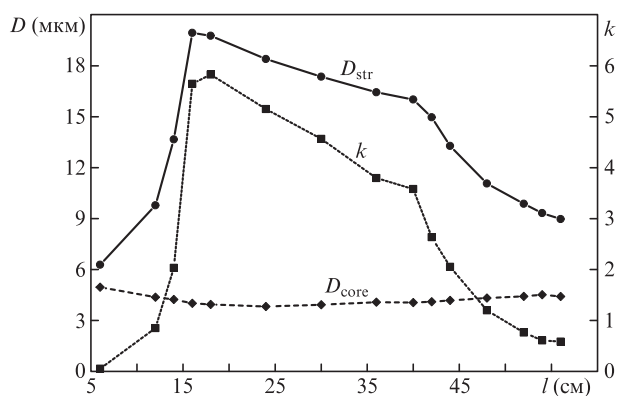


Рис.5. Измеренные зависимости внешнего диаметра структуры с шестью отверстиями  $D_{str}$ , диаметра сердцевины  $D_{core}$  и параметра  $k$  от положения запаянного торца заготовки  $l$ .

стекло. Нагрев заготовки носит неравномерный характер с определенным градиентом температуры, что и отражается в плавном изменении раздувания отверстий до расстояния  $l \sim 40$  см. И наконец, в процессе вытяжки МС по мере уменьшения заготовки ее запаянный торец пересекает верхний край печи (этот момент соответствует расстоянию  $l = 40$  см), после чего начинается более быстрое повышение температуры  $T_1$ . Это приводит к резкому уменьшению раздувания отверстий в соответствии с (4), что наглядно видно из рис.5.

### 3.3. Вытяжка МС с использованием дополнительного нагревателя для верхней части заготовки

Проведенные эксперименты показали, что основной причиной нестабильности параметров получаемых МС является неравномерный нагрев верхней части заготовки, что приводит к изменению раздувания отверстий в процессе вытяжки. Для изготовления длинных МС с постоянными геометрическими и физическими параметрами необходимо обеспечить поддержание постоянной температуры верхней части заготовки. Относительно простой способ — использование специального дополнительного нагревателя для верхней части заготовки (охлаждать ее и стабилизировать температуру сложнее). Этот нагреватель должен обеспечивать регулируемый профиль нагрева по длине, чтобы компенсировать вариации температуры верхней части заготовки. Степень раздувания отверстий в изготавливаемых МС определяется изменением средней температуры. Кроме того, задавая с помощью такого нагревателя заранее выбранный профиль температуры, можно изготавливать МС с постоянным внешним диаметром, но с переменным диаметром отверстий и, следовательно, с переменными оптическими параметрами МС по длине.

На рис.6 изображена схема вытяжки МС с дополнительным нагревателем для регулировки температуры верхней части заготовки. Верхний торец заготовки 1 запаян и приварен к вспомогательному стержню 2, закрепленному в системе подачи заготовки. Система подачи обеспечивает при вытягивании скорость ввода заготовки в печь  $v_1$ . Для нагрева заготовки до температуры вытяжки служит печь 3. Температура в центре печи в зоне протяжки для кварцевого стекла  $T_2 \approx 2143$  К. Вытяжка МС 4 производится со стороны нижнего конца заготовки с помощью приемного устройства, обеспечивающего скорость

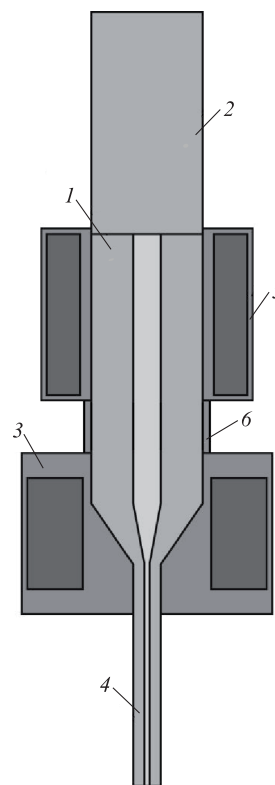


Рис.6. Схема вытяжки МС с использованием дополнительного нагревателя верхней части заготовки.

этого процесса  $v_2$ . Верхняя часть заготовки находится внутри дополнительного нагревателя 5 при температуре  $T_1$ , которая может меняться от комнатной до  $\sim 1200$  К. Между нагревателем и печью находится фланец 6 для установки диафрагм.

Основой нагревателя является керамическая трубка (внешний диаметр 23 мм, внутренний — 18 мм) длиной 42 см. На нее намотаны три независимые секции из хромовой ленты, каждая длиной 13 см. Электрическая мощность, подводимая к ним, может варьироваться в широких пределах, вплоть до полного выключения.

На рис.7,а приведены измеренные зависимости температуры внутри нагревателя от положения термодары  $l$  относительно его верхнего края по направлению к вытяжной печи. Отрицательные значения  $l$  соответствуют положениям над нагревателем. Зависимость I была получена при выключенном нагревателе и включенной вытяжной печи, температура в которой  $T_2 = 1973$  К. Зависимость II соответствует выключенной вытяжной печи и режиму нагревателя, обеспечивающему отрицательный градиент температуры в направлении печи для компенсации нагрева заготовки под ее влиянием. Зависимость III была получена при выключенной средней секции нагревателя, что давало максимально возможный градиент температуры внутри него.

На рис.7,б приведены рассчитанные по этим экспериментальным данным зависимости  $k(l)$ . В расчетах предполагалось, что нагрев и остывание заготовки в процессе ее перемещения происходят мгновенно, так что можно использовать соотношение  $k = T_2/T_1(l)$ , применимое для маленьких отверстий в МС.

Ход кривой I показывает, что по мере приближения заготовки к печи температура вдоль нее возрастает более чем на 150 К. Экстраполяция этой кривой до  $l = 67$  см



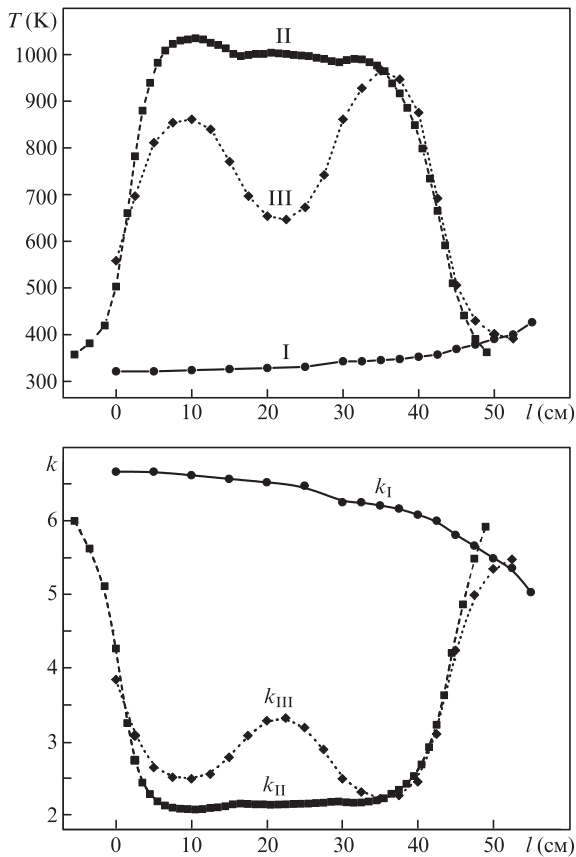


Рис.7. Измеренные зависимости температуры внутри нагревателя от положения термопары относительно его верхнего края в случае отсутствия нагрева (I) и при включении трех (II) и двух (III) обмоток (а), а также рассчитанные по ним зависимости параметра  $k$  от положения запаянного торца заготовки (б).

(что соответствует верхнему краю вытяжной печи) дает рост температуры более чем на 300 К. В соответствии с (4) такое изменение температуры должно привести к уменьшению степени раздувания отверстий до  $k \sim 3.5$ , что хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными на рис.5.

Для демонстрации возможностей вытяжки МС с использованием дополнительного нагревателя мы выбрали двулучепреломляющий микроструктурированный световод (ДМС) со структурой 724 [33, 34], имеющей два слоя отверстий. Заготовка для ДМС изготавливалась высверливанием отверстий в монолитном кварцевом стекле. Диаметр отверстий в первом слое составлял 2.1 мм, во втором – 2.5 мм, причем расстояние между отверстиями в первом слое  $\Lambda_1 = 3.4$  мм, что давало отношение  $d_{in}/\Lambda_1 = 0.62$ . Это должно было обеспечить после вытяжки такой заготовки при температуре дополнительного нагревателя 973 К отношение  $d_{2in}/\Lambda_2 = 0.92 < 1$  (см. (6)). Затем заготовка перетягивалась до меньшего диаметра, и для увеличения длины и обеспечения нужного размера сердцевины световода на нее нахлопывалась кварцевая трубка.

Эта структура представляет интерес с точки зрения детального экспериментального изучения процесса вытяжки МС из заготовок с запаянным верхним торцом, которые содержат большое количество отверстий, причем отверстия разного размера и окружения находятся на разном расстоянии от центра МС. Для дальнейшего анализа мы условно разбили эти отверстия на четыре груп-

пы. Соответствующие значения параметров  $k$  для этих групп отверстий мы обозначили  $k_1, k_2, k_3$  и  $k_4$ .

3.3.1. Вытяжка МС при постоянном профиле температуры нагревателя. Вытяжка проводилась при режиме работы нагревателя, который соответствовал кривой II (рис.7,а). В исходном положении (перед началом вытяжки) запаянный торец заготовки был на 13 см выше верхнего края нагревателя (т.е.  $l = -13$  см). Скорость подачи заготовки при вытяжке  $v_1 = 10^{-2}$  м/мин, скорость вытяжки  $v_2 \approx 30$  м/мин, ее точное значение определялось следящей системой, обеспечивающей внешний диаметр МС  $D_2 = 125$  мкм. Температура вытяжки  $T_2 = 2113$  К. На рис.8,а–д приведены изображения поперечного сечения вытянутого ДМС 724, соответствующие разным  $l$ , а на рис.8,е дано изображение поперечного сечения кейна, сделанные с помощью электронного микроскопа.

На рис.9 показаны измеренные зависимости параметра  $k$  и параметров  $k_1$ – $k_4$  от положения запаянного торца заготовки  $l$ , а также рассчитанная по измеренному ранее профилю температуры зависимость  $k_{II}(l)$ . Прежде всего необходимо отметить относительно небольшие отличия измеренных параметров  $k_1$ – $k_4$  от соответствующих значений  $k$ . Таким образом, можно заключить, что для данного варианта МС параметры раздувания отверстий, имеющих разный размер и различное окружение, совпадают с хорошей точностью, что согласуется с выра-

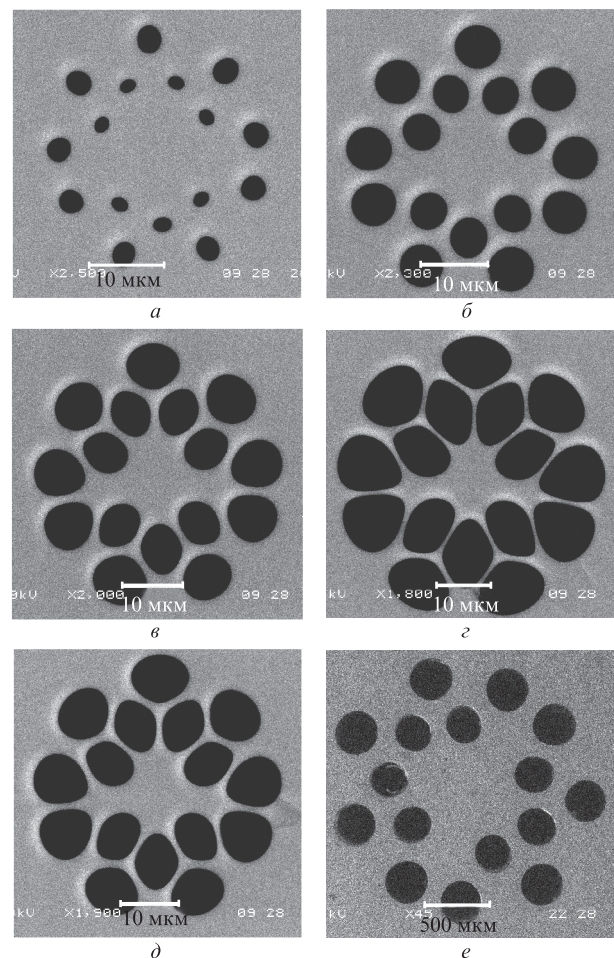


Рис.8. Микрофотографии поперечного сечения изготовленного ДМС 724 при вытяжке с постоянным профилем температуры нагревателя, соответствующие положениям запаянного торца заготовки  $l = -10.8$  (а),  $-8.7$  (б),  $-5.1$  (в),  $+0.2$  (г) и  $+17.9$  см (д) и кейна для вытяжки ДМС 724 (е).

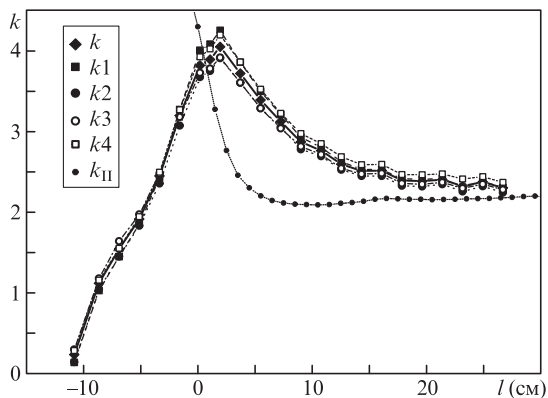


Рис.9. Измеренные зависимости параметров  $k$  и  $k_1-k_4$  от положения запаянного торца заготовки  $l$  при вытяжке с постоянным профилем температуры нагревателя, а также рассчитанное по измеренному профилю температуры значение  $k_{II}$ .

жением (7), использованным для анализа МС с круглыми отверстиями. Отметим, что в данном случае из-за малости отверстий в МС при учете возможного потока газа в отверстиях (см. (10)) различия в значениях  $k$  для отверстий разного диаметра не превышают 2%.

В установившемся стационарном режиме (при  $l > +18$  см) отличия измеренных значений параметра  $k$  от рассчитанных не превышают 10%. Это говорит о хорошей точности разработанной аналитической модели, описывающей трансформацию геометрической структуры МС в процессе вытяжки из заготовок с запаянным верхним торцом.

Процесс установления стационарного значения параметра раздувания  $k$  имеет несколько характерных черт. В начале вытяжки отверстия внешнего слоя раздуваются сильнее, чем внутреннего слоя (рис.8,а), что может быть обусловлено радиальным градиентом температуры заготовки в области перетяжки. Этот процесс можно разбить на два этапа (рис.9). Сначала происходит относительно медленный рост  $k$  до значения, соответствующего расчетному  $k_{II}$  (при  $l = +0.2$  см). Затем, поскольку после этого положения запаянного торца заготовки температура внутри нагревателя растет и, соответственно,  $k_{II}$  спадает до заданного постоянного уровня, параметр  $k$  начинает уменьшаться. Это уменьшение происходит относительно медленно и имеет примерно экспоненциальный характер:

$$k = k_0 + \Delta k \exp(-t/\tau), \quad (11)$$

где  $k_0 = 2.26$ ;  $\Delta k = 2.45$ ;  $\tau = 6.75$  мин (с учетом скорости  $v_1 = 10^{-2}$  м/мин). Такой характер установления стационарного значения параметра  $k$  (на обоих участках) объясняется, вероятно, довольно низкой температурой вытяжки ( $T_2 = 2113$  К, что примерно соответствует нижней границе рабочей температуры вытяжки для кварцевого стекла) и, следовательно, относительно высокой вязкостью кварцевого стекла, которая экспоненциально зависит от температуры [30]:

$$\mu = 5.8 \times 10^{-7} \exp\left(\frac{515400}{RT}\right), \quad (12)$$

где  $R = 8.31446$  Дж·моль $^{-1}$ ·К $^{-1}$  – универсальная газовая постоянная.

Преждевременное завершение вытяжки (при  $l = +26.7$  см) обусловлено обрывом МС, вероятно, из-за небольших повреждений заготовки при подъеме в вытяжную установку. В дальнейшем эта проблема была устранена с помощью дополнительных приспособлений, защищающих заготовку в процессе подъема от соприкосновения с металлическими элементами вытяжной установки.

3.3.2. Вытяжка МС при переменном профиле температуры нагревателя. Вытяжка проводилась при режиме нагревателя, который соответствовал кривой III на рис.7,а. В исходном положении (перед началом вытяжки) запаянный торец заготовки был на 9 см выше верхнего края нагревателя ( $l = -9$  см). Скорость подачи заготовки при вытяжке  $v_1 = 1.45 \times 10^{-2}$  м/мин, скорость вытяжки  $v_2 \approx 38$  м/мин. Внешний диаметр МС  $D_2 = 125$  мкм, температура вытяжки  $T_2 = 2163$  К. На рис.10 даны сделанные с помощью электронного микроскопа (с одинаковым увеличением) изображения поперечного сечения вытянутого ДМС 724 при разных  $l$ .

На рис. 11 приведены измеренные зависимости параметров  $k$  и  $k_1-k_4$  от  $l$ , а также рассчитанное по измеренному ранее профилю температуры значение  $k_{II}$ . Как и в случае предыдущего эксперимента, можно отметить относительно небольшие отличия измеренных параметров

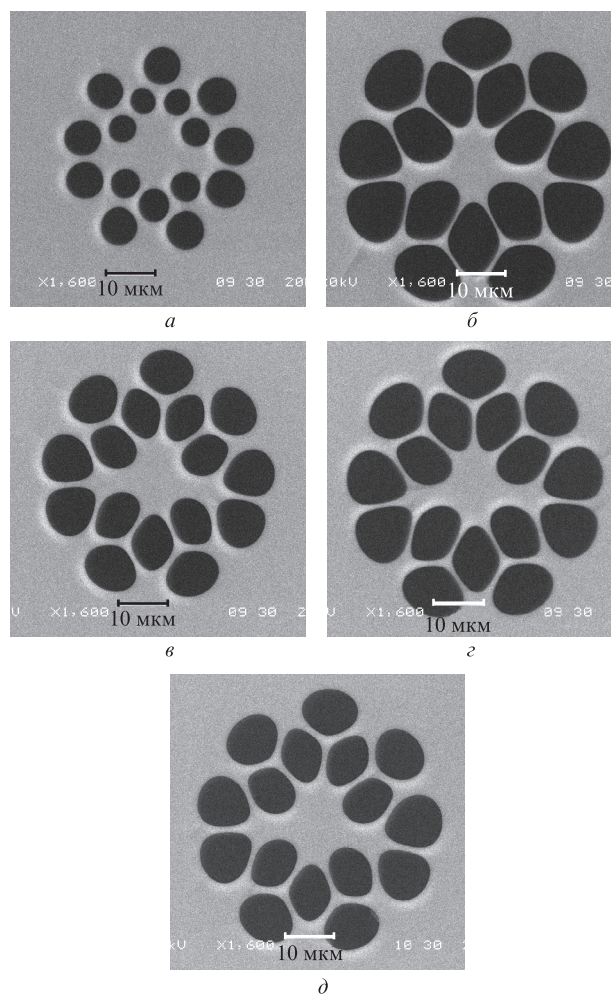


Рис.10. Микрофотографии поперечного сечения ДМС 724 при вытяжке с переменным профилем температуры нагревателя, соответствующие положениям запаянного торца заготовки  $l = -7.0$  (а),  $-3.0$  (б),  $+4.9$  (в),  $+24.6$  см (г) и  $+40.3$  см (д).



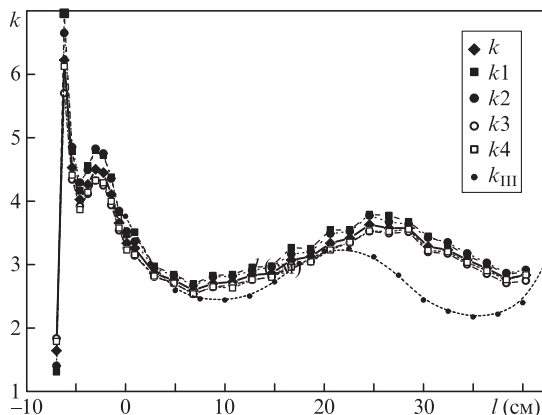


Рис.11. Измеренные зависимости параметров  $k$  и параметров  $k_1$ – $k_4$  от положения запаянного торца заготовки  $l$  при вытяжке с переменным профилем температуры нагревателя, а также рассчитанное по измеренному профилю температуры значение  $k_{III}$ .

$k_1$ – $k_4$  от  $k$ . Заметим, что здесь мы говорим именно о квазистационарном режиме, т.к. профиль температуры вдоль нагревателя является переменным, вследствие чего в процессе вытяжки МС параметр  $k$  также изменяется. Тем не менее и при таком режиме вытяжки для данного варианта МС параметры раздувания различных отверстий (с разными размером и окружением) совпадают с хорошей точностью.

Полученные в квазистационарном режиме ( $l = +3.0$ – $+38.4$  см) результаты несколько отличаются от описанных выше. Прежде всего стоит отметить очень хорошее совпадение экспериментальных значений параметра  $k$  и расчетного значения  $k_{III}$  сразу после установления квазистационарного режима ( $l = +3.0$  см), что подтверждает точность разработанной аналитической модели. Затем, как и следовало ожидать, наблюдается некоторое расхождение между измеренными значениями  $k$  и  $k_{III}$ , полученными в предположении, что нагрев и остывание заготовки в процессе ее перемещения происходят мгновенно. В реальности времена ее нагрева и остывания имеют ненулевые и к тому же разные значения. Поэтому при перемещении заготовки в переменном температурном поле поведение давления газа в отверстиях и, как следствие, параметра  $k$  подчиняется сложной зависимости, которая может быть определена лишь численными методами. В настоящей работе такая задача не ставилась. Однако, как видно из рис.11, величина и диапазон вариаций параметра  $k$  достаточно близки к расчетным значениям, что подтверждает практическую возможность изготовления длинных МС с изменяющимися по длине параметрами.

Квазистационарное значение параметра  $k$  в этом эксперименте устанавливается значительно быстрее, чем в предыдущем случае, и имеет несколько локальных максимумов, отражающих затухающий колебательный характер этого процесса: при  $l = -6.2$ ,  $-3.0$  и  $+0.9$  см. Таким образом, весь процесс происходит при перемещении заготовки лишь на  $\sim 8$  см, что существенно меньше, чем в предыдущем случае (около 29 см). Это объясняется более высокой температурой вытяжки  $T_2$  и, следовательно, меньшей вязкостью кварцевого стекла. Как и в предыдущем эксперименте, отверстия в МС появились с самого начала процесса вытяжки при  $l = -7.0$  см (рис.10,а), однако значения параметров  $k_i$  при этом оказались намного больше (рис.11), а их различия – меньше.

Сравнение двух экспериментов по вытяжке МС с использованием дополнительного нагревателя для верхней части заготовки показывает (см. рис.9 и 11), что время выхода вытяжки на стационарный/квазистационарный режим существенно зависит от температуры в вытяжной печи  $T_2$ , которая определяет вязкость кварцевого стекла в области перетяжки. Согласно (12) в рабочем диапазоне температур вытяжки МС (2113–2163 К) вязкость кварцевого стекла изменяется примерно в два раза. Таким образом, сравнение характера вариаций параметра  $k$  в двух экспериментах показывает, что оптимальная температура вытяжки должна быть близка к 2163 К или немного ниже.

Как видно на рис.11, рабочий диапазон смещений заготовки для изготовленного нагревателя составляет около 31 см. Примерно такой же диапазон можно обеспечить и для режима нагревателя с постоянным профилем температуры, если выбрать более высокую температуру вытяжки, чем в нашем первом эксперименте. Этот диапазон смещений соответствует длине вытянутого нами МС около 800 м при внешнем диаметре заготовки  $\sim 6$  мм. Простой расчет показывает, что из заготовки стандартного диаметра 8 мм можно вытянуть МС длиной более 1200 м и диаметром 125 мкм.

#### 4. Заключение

Проведен расчет процесса вытяжки МС из заготовок с запаянным верхним торцом, получена простая аналитическая модель, описывающая трансформацию геометрической структуры МС в этом процессе. Результаты вытяжки различных МС из заготовок с запаянным верхним торцом хорошо согласуются с теоретическими оценками, демонстрируя важность поддержания стабильной температуры верхней части заготовки для получения длинных МС с неизменными параметрами. Показано также, что в случае достаточно больших отверстий в МС необходимо учитывать дополнительные поправки к трансформации геометрической структуры при вытяжке световодов.

Экспериментально продемонстрировано, что с помощью дополнительного регулируемого нагрева верхней части заготовки возможно изготовление длинных (более 1200 м) МС как со стабильными, так и с меняющимися по длине параметрами. Экспериментально подтверждена возможность и относительная простота изготовления этим методом МС с отверстиями разных размеров.

Авторы выражают благодарность Е.М.Дианову за постоянный интерес к работе и ее поддержку.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-02-99688 А).

1. Ferrando A., Silvestre E., Andres P., Miret J., Andres M. *Opt. Express*, **9**, 687 (2001).
2. Saitoh K., Koshiba M., Hasegawa T., Sasaoka E. *Opt. Express*, **11**, 843 (2003).
3. Hartung A., Heidt A.M., Bartelt H. *Opt. Express*, **19**, 7742 (2011).
4. Zhang W.Q., Ebendorff-Heidepriem H., Monro T.M., Afshar V.S. *Opt. Express*, **19**, 21135 (2011).
5. Herzog A., Shamir A., Ishaaya A.A. *Opt. Lett.*, **37**, 82 (2012).
6. Sylvestre T., Ragueh A.R., Lee M.W., Stiller B., Fanjoux G., Barviau B., Mussot A., Kudlinski A. *Opt. Lett.*, **37**, 130 (2012).
7. Fitt A.D., Furusawa K., Monro T.M., Please C.P. *J. Lightwave Technol.*, **19**, 1924 (2001).
8. Fitt A.D., Furusawa K., Monro T.M., Please C.P., Richardson D.J. *J. Eng. Math.*, **43**, 201 (2002).



9. Xue S.C., Tanner R.I., Barton G.W., Lwin R., Large M.C.J., Poladian L. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 2245 (2005).
10. Xue S.C., Tanner R.I., Barton G.W., Lwin R., Large M.C.J., Poladian L. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 2255 (2005).
11. Xue S.C., Large M.C.J., Barton G.W., Tanner R.I., Poladian L., Lwin R. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 853 (2006).
12. Joyce C.J., Fitt A.D., Monro T.M. *J. Lightwave Technol.*, **26**, 791 (2008).
13. Stokes Y.M., Buchak P., Crowdy D.G., Ebendorff-Heidepriem H. *J. Fluid Mech.*, **755**, 176 (2014).
14. Luzi G., Eppe P., Scharrer M., Fujimoto K., Rauh C., Delgado A. *J. Lightwave Technol.*, **28**, 1882 (2010).
15. Chen M.J., Stokes Y.M., Buchak P., Crowdy D.G., Foo H.T.C., Dowler A., Ebendorff-Heidepriem H. *Opt. Mater. Express*, **6**, 166 (2016).
16. Russell P.St.J., Birks T.A., Knight J.C. U.S. Patent 6888992B2 (2005).
17. Wynne R.M. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 4304 (2006).
18. Boyd K., Ebendorff-Heidepriem H., Monro T.M., Munch J. *Opt. Mater. Express*, **2**, 1101 (2012).
19. Chen Y., Birks T.A. *Opt. Mater. Express*, **3**, 346 (2013).
20. Kostecki R., Ebendorff-Heidepriem H., Warren-Smith S.C., Monro T.M. *Opt. Mater. Express*, **4**, 29 (2014).
21. Chen M.J., Stokes Y.M., Buchak P., Crowdy D.G., Ebendorff-Heidepriem H. *J. Fluid Mech.*, **783**, 137 (2015).
22. DiGiovanni D.J., Vengsarkar A.M., Wagener J.L., Windeler R.S. U.S. Patent 5802236 (1998).
23. Joyce C.J., Fitt A.D., Hayes J.R., Monro T.M. *J. Lightwave Technol.*, **27**, 871 (2009).
24. Semjonov S.L., Denisov A.N., Dianov E.M., in *Specialty Optical Fibers, OSA Techn. Digest* (Opt. Soc. Am., 2012, STu1D.4).
25. Semjonov S.L., Denisov A.N., Senatorov A.K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **8961**, 896129 (2014).
26. Argyros A. *J. Lightwave Technol.*, **27**, 1571 (2009).
27. Liao M., Yan X., Duan Z., Suzuki T., Ohishi Y. *J. Lightwave Technol.*, **29**, 1018 (2011).
28. Liao M., Gao W., Duan Z., Yan X., Suzuki T., Ohishi Y. *Opt. Express*, **20**, 1141 (2012).
29. Luzi G., Eppe P., Scharrer M., Fujimoto K., Rauh C., Delgado A. *J. Lightwave Technol.*, **30**, 1306 (2012).
30. Jasion G.T., Shrimpton J.S., Chen Y., Bradley T., Richardson D.J., Poletti F. *Opt. Express*, **23**, 312 (2015).
31. Sutura S.P., Skalak R. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **25**, 1 (1993).
32. Dawe R.A., Smith E.B. *J. Chem. Phys.*, **52**, 693 (1970).
33. Денисов А.Н., Левченко А.Е., Семенов С.Л., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **41**, 243 (2011).
34. Denisov A.N., Semjonov S.L., Astapovich M.S., Senatorov A.K. *J. Lightwave Technol.*, **33**, 5184 (2015).