

На правах рукописи



**Денисов Александр Николаевич**

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕКЛЯННЫХ  
МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ  
СВЕТОВОДОВ С БОЛЬШИМ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕМ  
И МАЛОЙ АСИММЕТРИЕЙ МОДЫ**

01.04.21 – Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научный центр волоконной оптики Российской академии наук (НЦВО РАН)

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук **Семенов Сергей Львович**

**Официальные оппоненты:**

**Мельников Леонид Аркадьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой приборостроения Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ)

**Камынин Владимир Александрович**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров Института общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ им. А.М. Прохорова РАН)

**Ведущая организация:**

Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Защита диссертации состоится 11 декабря 2017 г. на заседании диссертационного совета Д002.063.03 при ИОФ РАН по адресу г. Москва 119991, ул. Вавилова, 38, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » октября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук  
тел.: +7(499)503-81-47



Т. Б. Воляк

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время изучение процессов генерации и преобразования когерентного оптического излучения в волоконных световодах (ВС), включая разработку источников излучения с неклассическими свойствами (например, источников суперконтинуума), а также физические аспекты волоконно-оптической связи являются крайне актуальными задачами, требующими фундаментального подхода к их решению. Одним из важнейших параметров, определяющих ход физических процессов при распространении лазерного излучения в ВС является их двулучепреломление. Изучение механизмов наведения двулучепреломления в ВС к началу работы над диссертацией было недостаточно всесторонним, так как большинство исследователей сосредотачивались в основном на практическом использовании уже известных решений, хотя еще не все возможности ВС и особенно микроструктурированных волоконных световодов (МВС) в этой области были исследованы.

МВС с большой величиной двулучепреломления ( $>10^{-5}$ ) или двулучепреломляющие МВС (ДМВС) разного дизайна впервые были представлены более 15 лет назад [1, 2]. Большая величина двулучепреломления требуется во многих волоконных датчиках и в других применениях ВС, где необходимо сохранение линейной поляризации света при его прохождении по световоду. МВС, известные также как фотоннокристаллические световоды, имеют весьма разнообразные структуры, среди которых высоконелинейные ДМВС обладают большим потенциалом для многих научных и прикладных применений, таких как генерация поляризованного суперконтинуума [3], физические измерения [4] и ряд других. Также эти ДМВС имеют определенные перспективы для использования в волоконно-оптических гироскопах [5].

Несмотря на полученные к настоящему времени результаты и постоянно растущее число публикаций по этой тематике, существует ряд задач, для решения которых необходимо привлечение новых физических эффектов либо более детальное изучение механизмов, ответственных за формирование характеристик МВС. В частности, для получения большой величины двулучепреломления наиболее распространенных ДМВС часто использовался эффект формы их сердцевин. Вследствие этого эффекта величина двулучепреломления определялась разностью размеров сердцевин ДМВС вдоль ортогональных координат [6]. Но при этом возникала большая асимметрия поля моды ДМВС, что приводило к дополнительным потерям мощности при их стыковке со световодами с круглой сердцевиной или при их использовании с лазерными пучками круглой формы [7].

При получении МВС и особенно ДМВС важной практической потребностью является обеспечение высокой стабильности заданных заготовкой структурных и, следовательно, физических параметров (например, величины двулучепреломления или дис-

персии) МВС в процессе их изготовления (вытяжки). Большое число публикаций было посвящено теоретическим и экспериментальным исследованиям различных методов вытяжки МВС, среди которых самым широко исследованным и практически используемым является вытяжка с подачей в отверстия заготовки газа под внешним давлением, на несколько процентов больше атмосферного [8–10]. Однако такой метод изготовления МВС обладает рядом ограничений и недостатков.

Перспективный, но малоисследованный метод изготовления МВС – вытяжка из заготовок с заплавленным верхним торцом – был впервые рассмотрен в [11]. При таком методе под влиянием эффекта авторегулирования давления в отверстиях (АРДО) заготовки через некоторое время после начала вытяжки может устанавливаться постоянный размер отверстий в МВС и постоянные параметры их структуры. Однако физические механизмы, определяющие формирование структуры МВС в этом процессе и, следовательно, их световедущие характеристики, были изучены слабо.

**Целью настоящей работы** являлось изучение механизмов наведения двулучепреломления в микроструктурированных волоконных световодах, на основе которого следовало провести разработку и исследование МВС с большим двулучепреломлением, но при этом обладающих малой асимметрией поля моды.

Для достижения поставленной цели ставились и решались следующие задачи.

1. Провести численные расчеты двулучепреломляющих характеристик разных вариантов предложенного оригинального дизайна ДМВС, который содержит одну или две пары отверстий в первом слое вокруг сердцевины, расположенных на увеличенном расстоянии друг от друга по сравнению с остальными парами отверстий. Показать, что предложенные структуры позволяют получить большую величину двулучепреломления при равных размерах поля моды по двум ортогональным координатам.

2. Изготовить и исследовать экспериментальные образцы ДМВС с большой величиной двулучепреломления и близкими размерами моды по двум ортогональным координатам.

3. Для обеспечения хорошей точности расчетов величины двулучепреломления изготовленных ДМВС построить и оптимизировать модельную структуру, которая имеет относительно простую геометрию и при этом достаточно точно описывает форму сердцевины изготовленных ДМВС.

4. Провести теоретический анализ эффекта авторегулирования давления в отверстиях (АРДО) при изготовлении МВС из заготовок с заплавленным верхним торцом, разработать аналитическую модель, описывающую трансформацию геометрической структуры МВС в этом процессе, определить основные физические факторы, влияющие на проявления эффекта АРДО.

5. Экспериментально исследовать проявления эффекта АРДО при изготовлении различных образцов МВС, сравнить полученные результаты с теоретическими оценками.

б. Провести экспериментальные исследования способа активного управления эффектом АРДО в процессе вытяжки МВС с помощью регулируемого нагрева верхней части заготовки с разными профилями температуры вдоль нее.

### **Научная новизна работы**

В работе теоретически и экспериментально показано, что предложенный оригинальный дизайн ДМВС позволяет получить большую величину двулучепреломления и, в отличие от других известных структур световодов данного типа, одновременно иметь равные или близкие размеры поля моды по двум ортогональным координатам.

Предложена модельная структура, которая имеет относительно простую геометрию и при этом обеспечивает хорошую точность расчетов величины двулучепреломления изготовленных ДМВС.

Проведен теоретический анализ и разработана аналитическая модель, описывающая проявления эффекта АРДО и трансформацию геометрической структуры при изготовлении МВС из заготовок с заплавленным верхним торцом.

Впервые предложен и экспериментально исследован способ активного управления эффектом АРДО при изготовлении МВС с помощью регулируемого нагрева верхней части заготовки.

### **Научно-практическая значимость работы**

Полученные теоретические и экспериментальные результаты показывают возможность практического изготовления предложенных вариантов ДМВС с большой величиной двулучепреломления и малой асимметрией моды, которые могут быть состыкованы со световодами с круглой сердцевиной или с круглыми лазерными пучками без дополнительных потерь мощности. Такие ДМВС могут быть использованы, в частности, для генерации поляризованного суперконтинуума, а также в волоконно-оптических гироскопах.

Проведенные теоретический анализ и экспериментальные исследования проявлений эффекта АРДО при изготовлении МВС из заготовок с заплавленным верхним торцом показывают потенциальные возможности этого метода для изготовления МВС со стабильными структурными параметрами.

Проведенные экспериментальные исследования способа активного управления эффектом АРДО в процессе изготовления МВС с помощью регулируемого нагрева верхней части заготовки показывают практическую применимость этого метода для изготовления длинных МВС с отверстиями разных размеров со стабильными структурными параметрами, а также с меняющимися по длине световода параметрами.

### **Достоверность результатов**

Все основные результаты диссертации являются оригинальными и научно обоснованными. Приведенные результаты численных расчетов и аналитических оценок хорошо согласуются с результатами проведенных экспериментов, что подтверждает достоверность полученных результатов.

### **Личный вклад автора**

Все изложенные в диссертации результаты получены диссертантом лично или совместно с соавторами при непосредственном его участии.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Предложенная структура ДМВС, содержащая одну или две пары отверстий в первом слое вокруг сердцевины, расположенных на увеличенном расстоянии друг от друга по сравнению с остальными парами отверстий, позволяет получить большую величину двулучепреломления ( $4,2 \times 10^{-3}$ ) при равных размерах поля моды по двум ортогональным координатам.

2. Изготовленные экспериментальные образцы ДМВС имеют большую величину двулучепреломления (до  $2,9 \times 10^{-3}$ ) и весьма близкие размеры поля моды по двум ортогональным координатам (1,65 и 1,56 мкм). Предложенная модельная структура ДМВС имеет относительно простую геометрию и при этом достаточно точно описывает форму сердцевины изготовленных ДМВС, что обеспечивает хорошую точность расчетов их двулучепреломления.

3. Проведенный теоретический анализ эффекта авторегулирования давления в отверстиях (АРДО) при изготовлении МВС из заготовок с заплавленным верхним торцом и полученная аналитическая модель позволяют достаточно точно описывать трансформацию геометрической структуры МВС в этом процессе.

4. Экспериментальные исследования проявлений эффекта АРДО при изготовлении различных образцов МВС показывают хорошее согласие с теоретическими оценками, демонстрируя корреляцию измеренной степени трансформации геометрической структуры МВС в процессе вытяжки с измеренным профилем температуры верхней части заготовки. Также аналитическая модель дает корректную оценку зависимости степени трансформации геометрической структуры от площади отверстий в МВС.

5. Предложенный и экспериментально исследованный способ активного управления эффектом АРДО в процессе изготовления МВС с помощью регулируемого нагрева верхней части заготовки позволяет изготавливать длинные МВС со стабильными параметрами, а также с меняющимися по длине световода параметрами.

### **Апробация работы**

Результаты исследований докладывались на 10 всероссийских и международных конференциях: IX Всероссийская конф. “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение” (Саранск, 2010); Третий международный форум по нанотехнологиям (Москва, 2010); SPIE Photonics West LASE (San Francisco, California, USA, 2011 и 2014); Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe (Munich, Germany, 2011); Третья, Четвертая и Пятая Всероссийские конф. по волоконной оптике (Пермь, 2011, 2013 и 2015); Advanced Photonics Congress, Specialty Optical Fibers & Applications (Colorado Springs, Colorado, USA, 2012), а также докладывались и обсуждались на семинарах НЦВО РАН.

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из которых 7 в трудах конференций, 5 в журналах из списка ВАК (выделены нижним подчеркиванием), а также получены 2 патента РФ на изобретения.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы (первая глава), трех оригинальных глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации – 114 страниц машинописного текста, содержит 72 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 118 наименований.

## **II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность данной работы, сформулирована цель работы и задачи исследования.

**Глава 1** представляет собой обзор литературных источников, в котором показано современное состояние теоретических и экспериментальных исследований различных вариантов ДМВС, а также рассмотрены их различные практические применения. Также в этой главе представлены работы, посвященные теоретическим и экспериментальным исследованиям различных методов изготовления МВС.

В **параграфе 1.1** дано краткое описание основных известных вариантов структурных конфигураций ДМВС, причем в **параграфе 1.1.1** описывается история создания и первые конфигурации ДМВС (рис. 1). Поскольку эти ДМВС обладают большой эллиптичностью сердцевины и, следовательно, большой асимметрией поля моды, в настоящей работе предложено для характеристики асимметрии моды использовать параметр  $w$ , который определяется как относительная разность размеров поля моды по двум ортогональным координатам:

$$w = \frac{W_x - W_y}{(W_x + W_y)/2}, \quad (1)$$

где  $W_x$  и  $W_y$  – размеры поля моды (полная ширина по уровню половины интенсивности) по осям  $x$  и  $y$  соответственно. В частности, для ДМВС из [2] параметр асимметрии моды  $w \approx 0,54$ .

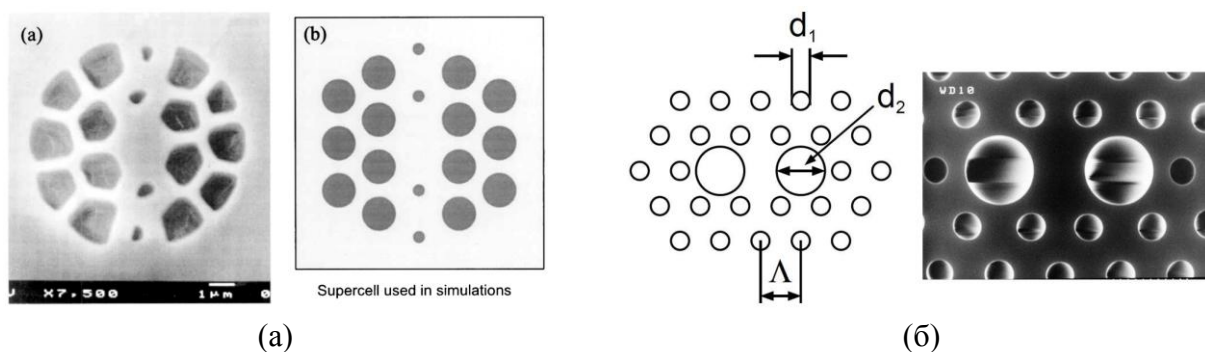


Рис. 1. а) Микрофотография поперечного сечения и структура ДМВС из [1]; б) структура и микрофотография поперечного сечения ДМВС из [2].

В параграфе 1.1.2 рассмотрены различные работы, касающиеся одной из самых широко применяемых структур ДМВС, предложенной авторами работы [2]. В [3] приведен краткий обзор применений суперконтинуума и отмечены преимущества использования ДМВС для генерации поляризованного суперконтинуума по сравнению с ВС типа ПАНДА. Исследована возможность применения поляризованного суперконтинуума в качестве источника для генерации перестраиваемого видимого или УФ-излучения путем нелинейного преобразования в кристаллах типа ВВО. В [5] описаны основные преимущества использования ДМВС в волоконно-оптическом гироскопе (ВОГ) по сравнению с ВС типа ПАНДА. Предложен вариант ДМВС уменьшенного диаметра с оптимизированной структурой, который обеспечивает необходимую прочность ВС, малые уровни потерь на вытекание и изгибных потерь, требуемую величину двулучепреломления и малые потери на стыковку со световодом с круглой сердцевинной. Потери на стыковку с ВС, имеющим симметричное поле моды, определялись с помощью соотношения [7]:

$$\alpha = -10 \lg \left( \frac{4 \cdot W_x \cdot W_y \cdot W_c^2}{(W_x^2 + W_c^2) \cdot (W_y^2 + W_c^2)} \right), \quad (2)$$

где  $W_c$  – диаметр поля моды ВС с круглой сердцевинной, остальные обозначения соответствуют выражению (1). Рассчитанные по (2) потери на стыковку этого ДМВС с ВС, имеющим круглое поле моды составили  $\sim 0,32$  дБ, а экспериментально измеренные потери на стыковку составили  $\sim 0,53$  дБ.

В параграфах 1.1.3–1.1.6 рассмотрены еще некоторые варианты структур ДМВС, которые показывают большие потенциальные возможности их варьирования, а также отражают неослабевающий интерес исследователей к этим МВС. Однако при всем разнообразии структур ДМВС общим для них является большая эллиптичность сердцевинной, которая необходима для получения большой величины двулучепреломления.



Как показано в работе [6], величина фазового двулучепреломления в случае основной  $LP_{01}$  моды определяется выражением:

$$B \approx \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{4\pi n_1^2} \left(\frac{\lambda}{b}\right)^3 \left[1 - \left(\frac{b}{a}\right)^3\right], \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $n_1$  и  $n_2$  – эффективные показатели преломления сердцевинки и оболочки;  $\bar{n}$  – средний эффективный показатель преломления для двух ортогонально поляризованных мод;  $a$  и  $b$  – большая и меньшая стороны эквивалентного прямоугольника сердцевинки соответственно.

В параграфе 1.2 сделан обзор литературных источников, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям различных методов изготовления МВС. В параграфе 1.2.1 рассмотрены работы, относящиеся к исследованиям вытяжки МВС из заготовок с открытыми в атмосферу отверстиями, а в параграфе 1.2.2 рассмотрен метод вытяжки МВС с использованием подачи в отверстия заготовки газа под внешним давлением на несколько процентов больше атмосферного. При этом кратко отмечены некоторые недостатки этих методов.

В параграфе 1.2.3 рассмотрены работы [11, 12], относящиеся к альтернативному методу вытяжки МВС из заготовок с заплавленным верхним торцом с использованием эффекта авторегулирования давления в отверстиях (АРДО). Описанные в [11] МВС показывают почти полное сохранение пропорций между размерами отверстий и расстояниями между ними как в заготовке, так и в световоде. В [12] предложен метод математического моделирования механизма АРДО на примере вытяжки капилляра – простейшего МВС с одним отверстием – из заготовки, в которой верхний торец заплавлен. Модель решается численными методами, и результаты сравниваются с экспериментальными результатами. Для упрощения задачи авторы [12] пренебрегли силами поверхностного натяжения в исходной системе уравнений и для численного решения модели использовали упрощенную систему. В итоге это привело к значительному расхождению результатов расчета и эксперимента.

**Глава 2** посвящена теоретическому исследованию нового дизайна ДМВС, обладающего большой величиной двулучепреломления, но при этом имеющего малую асимметрию поля моды. В параграфе 2.1 дается описание геометрической структуры нового дизайна ДМВС, основные варианты которого приведены на рис. 2. На рис. 2а приведен первый вариант нового ДМВС с одним зазором, имеющий в данном конкретном случае 6 отверстий в первом слое. Сердцевина ДМВС имеет форму окружности или эллипса (пунктирная линия). Отверстия в первом слое вокруг сердцевинки (выделены серым цветом) имеют диаметр  $d$  и расположены на равных расстояниях  $\Lambda$  друг от друга кроме одной пары отверстий, которые находятся на расстоянии  $\Lambda_1 > \Lambda$ . Дополнительное отверстие напротив зазора (выделено темно-серым цветом) “закрывает”

его и также находится на расстоянии  $\Lambda$  от этих двух отверстий. Диаметры сердцевины вдоль осей  $x$  и  $y$  равны  $D_x$  и  $D_y$  соответственно. Эллиптичность сердцевины ДМВС определяется выражением  $e = D_x/D_y$ .

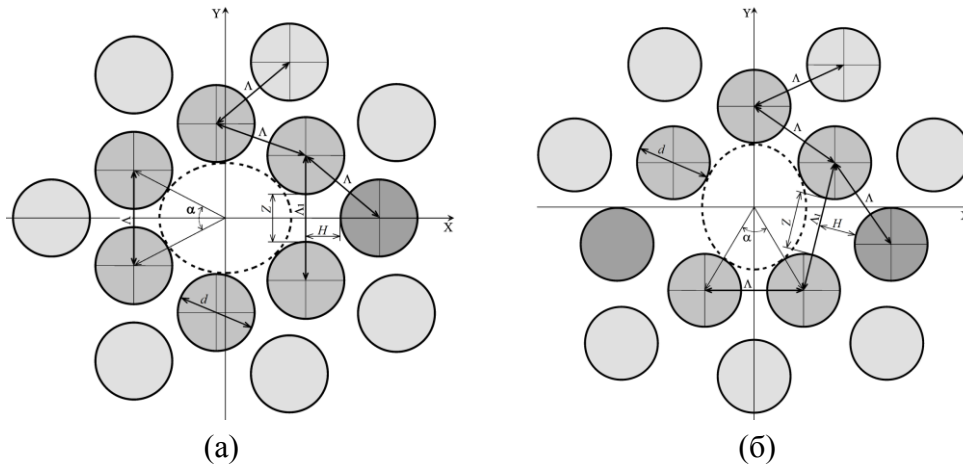


Рис. 2. а) Структура первого варианта ДМВС\_01:  $d/\Lambda = 0,75$ ,  $\Lambda_1/\Lambda = 1,33$ ,  $e = 1,2$ ; б) структура второго варианта ДМВС\_02:  $d/\Lambda = 0,75$ ,  $\Lambda_1/\Lambda = 1,33$ ,  $e = 0,83$ .

На рис. 2б приведен второй вариант нового ДМВС, имеющий 5 отверстий в первом слое и два одинаковых зазора, каждый из которых закрывается одним дополнительным отверстием. Третий и четвертый варианты ДМВС отличаются от первых двух наличием двух отверстий, закрывающих каждый зазор. Для характеристики формы ДМВС используется нормированное отклонение угла  $\alpha$  (см. рис. 2) от его максимального значения, называемое параметром формы  $\delta$ :

$$\delta = \frac{(2\pi/M - \alpha)}{(2\pi/M - 2\pi/(M + K))}. \quad (4)$$

Здесь  $M$  – количество отверстий в первом слое,  $K$  – суммарное число дополнительных отверстий, закрывающих зазоры.

В параграфе 2.2 проведены численные расчеты двулучепреломляющих и дисперсионных характеристик разных вариантов предложенных ДМВС. В параграфе 2.2.1 приведены результаты расчетов представленных выше конфигураций с круглой сердцевинной и разными геометрическими параметрами для того, чтобы определить собственный вклад увеличенного зазора в двулучепреломление ДМВС. В параграфе 2.2.2 приведены результаты расчетов этих конфигураций ДМВС с эллиптической сердцевинной. На рис. 3а приведены зависимости фазового двулучепреломления  $B$  от параметра формы  $\delta$  для ДМВС\_01 и ДМВС\_02 с разной эллиптичностью сердцевинной  $e$ . Величины двулучепреломления нормированы на их максимальные значения для этих ДМВС с круглой сердцевинной:  $3,0 \times 10^{-4}$  для ДМВС\_01 и  $5,0 \times 10^{-4}$  для ДМВС\_02. На рис. 3б показаны зависимости параметра асимметрии моды  $w$  и величины фазового двулучепреломления  $B$  от параметра формы  $\delta$  для  $x$ - ( $w_x$ ) и  $y$ -поляризованных ( $w_y$ ) фундаментальных мод ДМВС\_05 с сердцевинной диаметром  $D_y = 2,5$  мкм и эллиптичностью  $e = 0,8$

на длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм. Этот ДМВС имеет четыре отверстия в первом слое, два зазора и по два отверстия, закрывающих каждый зазор. Как видно на этом рисунке, при значении параметра формы  $\delta_0 \approx 0,094$  размеры у-поляризованной моды по двум координатам совпадают (индекс "0" отвечает нулевому значению параметра асимметрии моды  $w = 0$ ). Соответствующее значение фазового двулучепреломления  $B_0 = 1,3 \times 10^{-3}$  и группового двулучепреломления  $G_0 = 2,3 \times 10^{-3}$ .

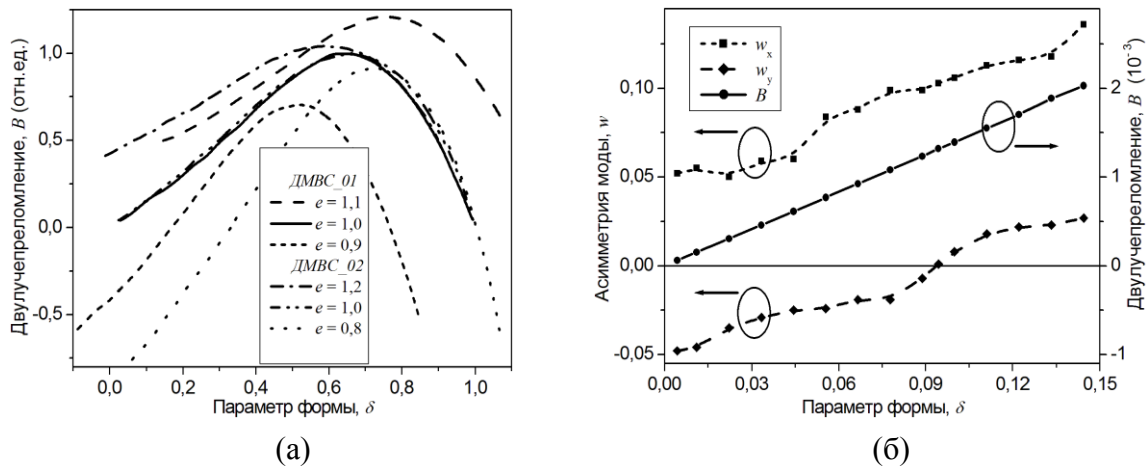


Рис. 3. а) Зависимости фазового двулучепреломления  $B$  от параметра формы  $\delta$  для ДМВС\_01 и ДМВС\_02 с разной эллиптичностью сердцевин  $e$ ; б) зависимости параметра асимметрии моды  $w$  и величины фазового двулучепреломления  $B$  от параметра формы  $\delta$  для  $x$ - ( $w_x$ ) и  $y$ -поляризованных ( $w_y$ ) фундаментальных мод ДМВС\_05.

**В главе 3** приведены результаты экспериментальных исследований изготовленных образцов двух вариантов ДМВС с малой асимметрией поля моды. В параграфе 3.1 приведены результаты исследований изготовленных образцов ДМВС\_01 с разным внешним диаметром и, соответственно, с разным диаметром сердцевин. На рис. 4 приведены электронные микрофотографии одного из полученных ДМВС\_01, сделанные с разным увеличением. На этом рисунке видно, что форма отверстий изготовленного ДМВС\_01 заметно отличается от круглой. Однако на первом этапе для численных расчетов его параметров использовалось моделирование сердцевин ДМВС\_01 структурой, имеющей одинаковые круглые отверстия. Полученное для этого образца ДМВС\_01 расчетное значение группового двулучепреломления на длине волны  $\lambda = 1,53$  мкм  $G_c = 4,2 \times 10^{-4}$  заметно отличается от измеренного значения  $G_m = (4,7 \pm 0,1) \times 10^{-4}$ , что потребовало улучшения модельной структуры ДМВС. Для этого в параграфе 3.1.1 был проведен сравнительный анализ 10 различных модельных структур, который показал, что при прочих равных параметрах важным фактором является кривизна отверстий в ближайшей к сердцевине ДМВС области. Кроме того, была обнаружена независимость рассчитанной величины двулучепреломления от наличия или отсутствия второго слоя отверстий. В итоге была предложена модельная структура, которая имеет относительно простую геометрию и при этом достаточно точно описывает форму сердцевин изготовленных ДМВС. Эта структура содержит только один

слой отверстий, аппроксимированных комбинациями окружности и эллипса. Получено хорошее согласие измеренных и рассчитанных с помощью этой модели величин двулучепреломления изготовленных ДМВС.

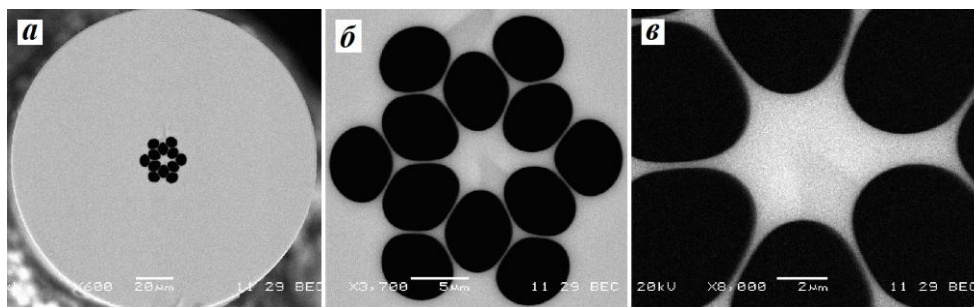


Рис. 4. Микрофотографии изготовленного образца ДМВС\_01 с разным увеличением.

В параграфе 3.2 приведены результаты исследований изготовленных образцов ДМВС\_02 с разным внешним диаметром. На рис. 5 приведены электронные микрофотографии одного из полученных ДМВС\_02, сделанные с разным увеличением.

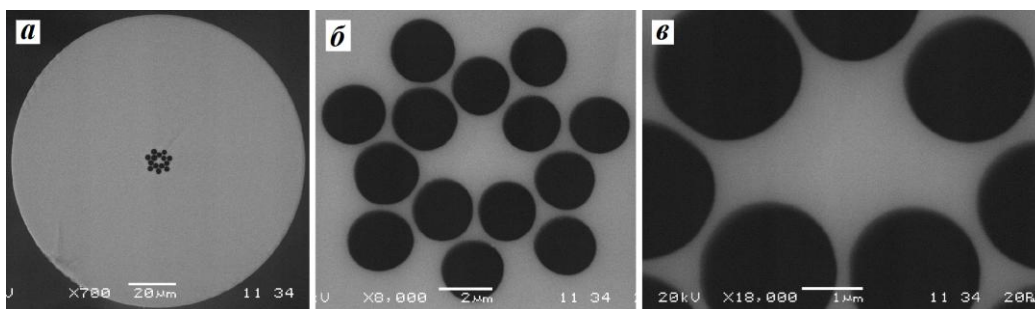


Рис. 5. Микрофотографии изготовленного образца ДМВС\_02 с разным увеличением.

Поскольку форма отверстий этого ДМВС лишь незначительно отличается от окружности, для численных расчетов его двулучепреломления было использовано моделирование его сердцевины простой структурой с эллиптическими отверстиями, что дало хорошее согласие измеренных и рассчитанных величин. Для образца ДМВС\_02 с внешним диаметром 127 мкм и диаметром сердцевины  $D_y = 2,9$  мкм расчетное значение группового двулучепреломления на длине волны  $\lambda = 1,53$  мкм  $G_c = 2,8 \times 10^{-3}$  с точностью до ошибок измерения совпадает с измеренным значением  $G_m = (2,9 \pm 0,1) \times 10^{-3}$ .

Также были рассчитаны распределения интенсивностей для  $x$ - и  $y$ -поляризованных фундаментальных мод для модельной структуры изготовленного образца ДМВС\_02 с внешним диаметром 127 мкм. Результаты расчетов приведены на рис. 6а,б. Параметры асимметрии моды для  $x$ - и  $y$ -поляризованных компонент фундаментальной моды для модельной структуры этого образца ДМВС\_02 равны  $w_x = 0,037$  и  $w_y = 0,043$  соответственно.

С помощью разработанного и изготовленного в НЦВО РАН специального прибора для измерения углового распределения выходящего излучения световодов в дальней зоне [13] были измерены параметры выходящего излучения для образца ДМВС\_02 с внешним диаметром 127 мкм. Измерения были проведены на длине волны

1,53 мкм, поляризация излучения не контролировалась. Измеренное распределение интенсивности поля моды для этого образца приведено на рис. 6в, размеры поля моды по двум ортогональным координатам составили 1,65 и 1,56 мкм. Измеренное значение параметра асимметрии моды  $w \approx 0,056$  хорошо совпадает с результатами расчетов для модельной структуры этого образца ДМВС\_02.

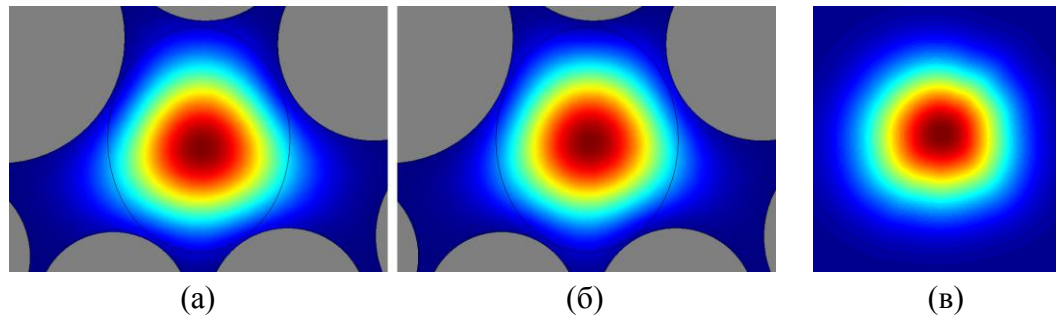


Рис. 6. Рассчитанные распределения интенсивности для  $x$ - (а) and  $y$ - (б) поляризаций  $LP_{01}$  моды для модельной структуры изготовленного образца ДМВС\_02; в) измеренное распределение интенсивности моды для изготовленного образца ДМВС\_02.

Расчеты потерь по формуле (2) на стыковку изготовленного ДМВС\_02 со световодом, имеющим круглое поле моды, дают значение  $\sim 0,004$  дБ, что практически означает отсутствие дополнительных потерь.

В параграфе 3.3 приводится анализ результатов, полученных в параграфах 3.1–3.2. В результате этого анализа предложен алгоритм поиска оптимальной структуры ДМВС, обеспечивающей равные размеры моды по двум ортогональным координатам и максимальное значение двулучепреломления при выбранном размере сердцевинки на заданной длине волны. В качестве первого шага предложен ДМВС\_06, который имеет семь отверстий в первом слое, два зазора, четыре дополнительных отверстия, закрывающих зазоры (по два на каждое) и эллиптичность сердцевинки  $e = 0,7$ . Расчеты показали, что этот ДМВС\_06 при значении параметра формы  $\delta_0 = 0,695$  имеет величину группового двулучепреломления  $G_0 = 4,2 \times 10^{-3}$  при равных размерах моды по двум ортогональным координатам.

**Глава 4** посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям эффекта авторегулирования давления в отверстиях при изготовлении МВС из заготовок с заплавленным верхним торцом. В параграфе 4.1 проведен теоретический анализ эффекта АРДО, получена аналитическая модель, описывающая трансформацию геометрической структуры МВС в этом процессе. Для простого случая вытягивания кварцевой трубки с исходным внешним диаметром  $D_1$  и отверстием диаметром  $d_1$  в капилляр с внешним диаметром  $D_2$  и отверстием диаметром  $d_2$  получено соотношение

$$\frac{d_2^2}{D_2^2 - d_2^2} = \frac{d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \cdot k, \quad (5)$$

где параметр трансформации  $k$  отражает изменение (увеличение) относительной площади отверстия в капилляре по сравнению с его относительной площадью в заготовке:

$$k = \frac{T_2}{T_1} \cdot \left( 1 + \frac{d_2^2}{32\eta L v_2} \cdot (P_2 - P_3) \right)^{-1}. \quad (6)$$

Здесь  $T_2$  – температура в центре вытяжной печи,  $T_1$  – температура верхней части заготовки,  $v_2$  – скорость вытягивания капилляра,  $\eta$  – динамическая вязкость газа в отверстии,  $L$  – длина, на которой вытянутый капилляр остывает до комнатной температуры,  $P_2$  и  $P_3$  – давления газа в горячей и холодной частях вытянутого капилляра соответственно. На рис. 7а приведены рассчитанные по (6) зависимости параметра трансформации  $k$  от диаметра отверстия  $d_2$  для нескольких значений скорости вытяжки  $v_2$ .

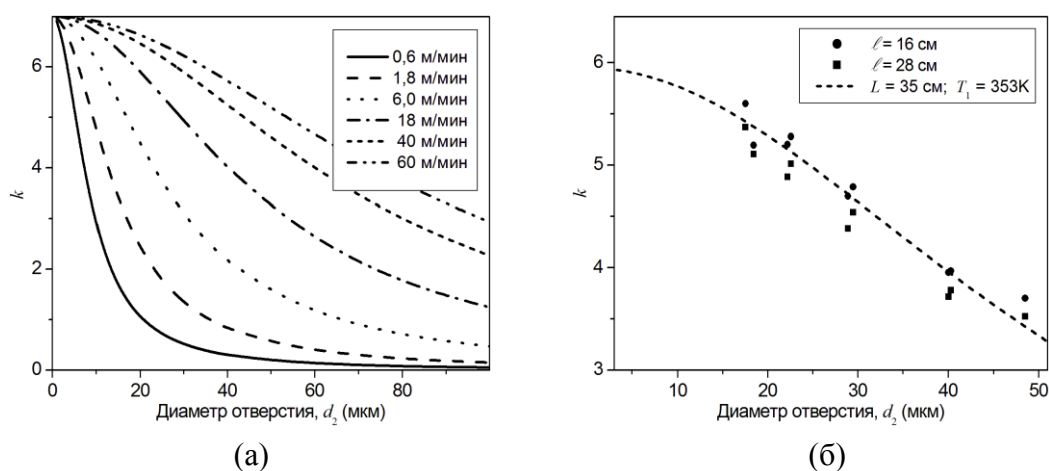


Рис. 7. а) Рассчитанные зависимости параметра трансформации  $k$  от диаметра отверстия  $d_2$  для нескольких значений скорости вытяжки  $v_2$ ; б) измеренные зависимости параметра трансформации  $k$  от диаметра отверстия для положений заплавленного торца заготовки  $l = 16$  см и  $l = 28$  см и расчет зависимости  $k(d_2)$  по (6) (штриховая кривая).

Таким образом, из выражения (6) следует, что ключевыми параметрами, определяющими степень трансформации  $k$  геометрической структуры МВС, являются отношение температуры в вытяжной печи к температуре верхней части заготовки, площадь отверстий в МВС (квадрат диаметра) и скорость вытяжки.

В параграфе 4.2 приведены результаты экспериментальных исследований проявлений эффекта АРДО при изготовлении МВС. В параграфе 4.2.1 приведены результаты вытяжки капилляра – простого МВС с одним отверстием. В параграфе 4.2.2 для экспериментальной проверки соотношения (6) была изготовлена заготовка методом сборки кварцевых капилляров разного диаметра и сплошных стерженьков, из которой было вытянуто простое волокно без каких-либо световедущих свойств. Хотя отверстия в вытянутом волокне имеют некруглую форму, для удобства сравнительного анализа по их измеренным площадям были рассчитаны соответствующие диаметры. Затем определялись значения параметра трансформации  $k$  по соотношению (5). На рис. 7б показаны измеренные зависимости параметра трансформации  $k$  от диаметра отверстия.



Пунктирная линия на этом графике отображает рассчитанную по (6) зависимость  $k(d_2)$  при  $L = 35$  см и  $T_1 = 353$  К. Хорошее совпадение измеренных и рассчитанной зависимостей демонстрирует, что аналитическая модель дает корректную оценку зависимости степени трансформации геометрической структуры от размеров отверстий в МВС.

В параграфе 4.2.3 приведены результаты вытяжки МВС с 6 отверстиями. На рис. 8 представлены измеренные зависимости диаметра сердцевины  $D_{\text{core}}$  и параметра трансформации  $k$  от положения заплавленного торца заготовки  $\ell$ .

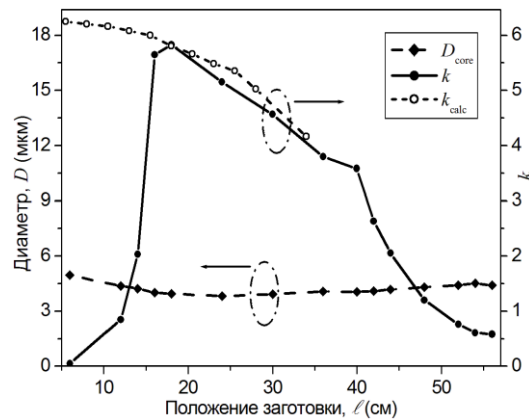


Рис. 8. Измеренные зависимости диаметра сердцевины  $D_{\text{core}}$  для МВС с 6 отверстиями и параметра трансформации  $k$  от положения заплавленного торца заготовки  $\ell$ , а также рассчитанные по измеренному профилю температуры значения  $k_{\text{calc}}$ .

Весь диапазон изменения  $\ell$  можно условно разделить на три области: сначала идет процесс установления параметра трансформации  $k$  (до  $\ell \approx 16$  см), потом достигается квазистационарное состояние, при котором происходит плавное уменьшение параметра трансформации  $k$ , что, по-видимому, обусловлено неравномерным нагревом верхней части заготовки под действием вытяжной печи. Затем заплавленный торец заготовки пересекает верхний край печи (при  $\ell \approx 40$  см) и с этого момента начинается более резкое повышение  $T_1$ . Это приводит к резкому уменьшению параметра трансформации  $k$  в соответствии с (6), что наглядно видно на рис. 8.

Для проверки предположения о неравномерном нагреве верхней части заготовки были проведены дополнительные измерения температуры  $T_{\text{ха}}$  внутри кварцевой трубки, установленной в вытяжную установку вместо заготовки. На рис. 8 приведена рассчитанная по этим экспериментальным данным зависимость параметра трансформации  $k_{\text{calc}}$  от положения заготовки  $\ell$ . Можно отметить хорошее совпадение измеренных значений параметра трансформации  $k$  и рассчитанных величин  $k_{\text{calc}}$ . Это подтверждает сделанное выше предположение о влиянии профиля температуры верхней части заготовки на проявления эффекта АРДО.

В параграфе 4.3 приводятся результаты экспериментальных исследований способа активного управления эффектом АРДО в процессе изготовления МВС с помощью регулируемого нагрева верхней части заготовки с разными профилями температуры

вдоль нее. Для того чтобы обеспечить поддержание постоянной температуры верхней части заготовки, впервые предложено использовать специальный дополнительный нагреватель для верхней части заготовки, поскольку ее гораздо сложнее охладить и стабилизировать профиль температуры вдоль нее. Этот нагреватель должен обеспечивать регулируемый профиль нагрева по длине для того, чтобы компенсировать вариации температуры вдоль верхней части заготовки. Изменением средней температуры можно менять степень раздувания отверстий в изготавливаемых МВС. Кроме того, задавая с помощью такого нагревателя определенный профиль температуры, можно изготавливать МВС с постоянным внешним диаметром, но с переменным раздуванием отверстий и, следовательно, с переменными оптическими параметрами МВС вдоль длины.

В параграфе 4.3.1 приводятся результаты вытяжки МВС при постоянном профиле температуры верхней части заготовки. Для этих экспериментов был выбран ДМВС\_07, который отличается от описанного выше ДМВС\_06 тем, что отверстия второго слоя имеют больший диаметр, чем отверстия первого слоя. На рис. 9а–д приведены микрофотографии поперечного сечения вытянутого образца ДМВС\_07, соответствующие разным положениям заплавленного торца заготовки  $\ell$ , а на рис. 9е приведена микрофотография поперечного сечения заготовки.

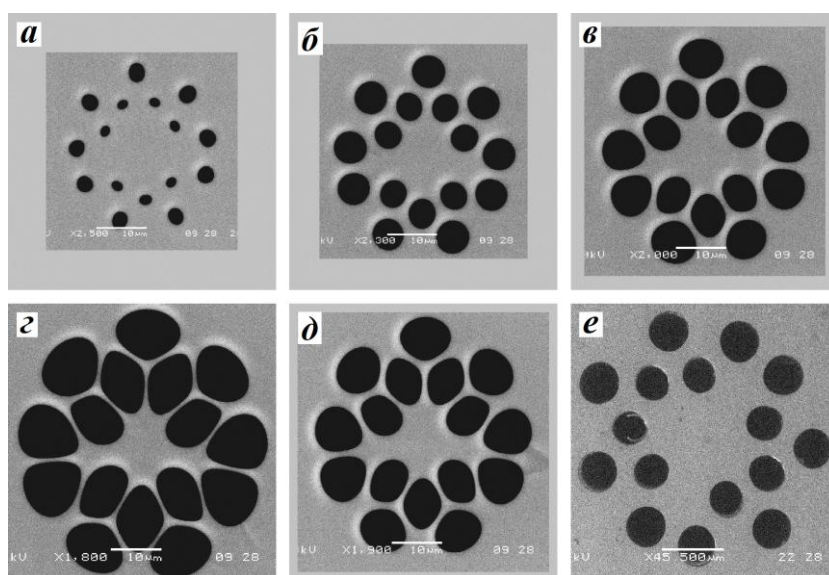


Рис. 9. Микрофотографии поперечного сечения изготовленного образца ДМВС\_07, соответствующие положениям заплавленного торца заготовки  $\ell = -10,8$  см,  $-8,7$  см,  $-5,1$  см,  $+0,2$  см и  $+17,9$  см (а–д) и микрофотография поперечного сечения заготовки (е).

Для данной главы эта структура интересна тем, что она содержит большое количество отверстий; отверстия имеют разный размер и различное окружение; кроме того, отверстия находятся на разном расстоянии от центра МВС. Для дальнейшего анализа эти отверстия условно разбиты на 4 группы. Соответствующие значения параметров трансформации для этих групп отверстий обозначены символами  $k1$ ,  $k2$ ,  $k3$  и  $k4$ . На рис. 10а приведены измеренные зависимости параметра трансформации  $k$  и параметров  $k1-k4$  от положения заплавленного торца заготовки  $\ell$ , а также рассчитанное по из-



меренному ранее профилю температуры значение  $k_c$ . Прежде всего необходимо отметить относительно небольшие отличия измеренных параметров  $k1-k4$  от соответствующих значений параметра трансформации  $k$ . Во-вторых, в установившемся стационарном режиме (при  $\ell > 18$  см) отличия измеренных значений параметра трансформации  $k$  от рассчитанных значений не превышают 10%. В-третьих, относительно медленное установление стационарного значения параметра трансформации  $k$  объясняется, вероятно, довольно низкой температурой вытяжки, которая была в данном эксперименте (2113 К) и, соответственно, относительно высокой вязкостью кварцевого стекла.

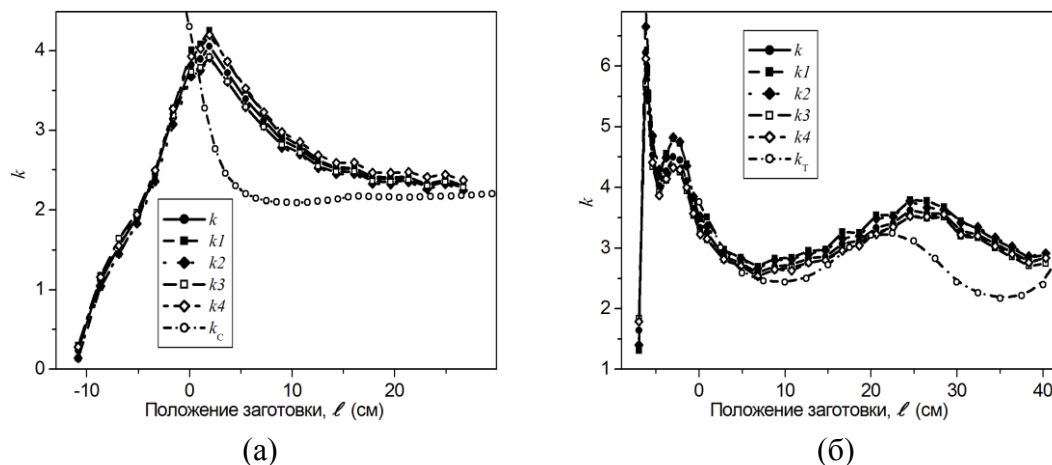


Рис. 10. Измеренные и рассчитанные зависимости параметров трансформации от положения заплавленного торца заготовки  $\ell$  при вытяжке с постоянным (а) и переменным (б) профилями температуры нагревателя.

В параграфе 4.3.2 приводятся результаты вытяжки МВС при переменном профиле температуры верхней части заготовки. На рис. 10б приведены измеренные зависимости параметра трансформации  $k$  и параметров  $k1-k4$  от положения заплавленного торца заготовки  $\ell$ , а также рассчитанное по измеренному ранее профилю температуры значение  $k_T$ . Так же как и для предыдущего эксперимента, можно отметить относительно небольшие отличия измеренных параметров  $k1-k4$  от соответствующих значений параметра трансформации  $k$ . Процесс установления квазистационарного значения параметра трансформации  $k$  в этом эксперименте существенно быстрее, чем в предыдущем случае, что объясняется более высокой температурой вытяжки (2163 К) и, соответственно, меньшей вязкостью кварцевого стекла. После установления квазистационарного режима наблюдается некоторое расхождение между измеренными значениями параметра трансформации  $k$  и расчетными значениями  $k_T$ , полученными в предположении, что нагрев и остывание заготовки в процессе ее перемещения происходят идеально быстро. Реально времена прогрева и остывания заготовки имеют заметные и к тому же разные значения. Поэтому при перемещении заготовки в переменном температурном поле давление газа в отверстиях и, как следствие, параметр трансформации  $k$  изменяется по сложной зависимости, которая может быть определена лишь численными методами. В настоящей главе такая задача не ставилась. Однако, как видно на

рис. 10б, величина и диапазон вариаций параметра трансформации  $k$  достаточно близки к расчетным значениям, что подтверждает практическую возможность изготовления длинных МВС с меняющимися по длине параметрами. В параграфе 4.3.3 приводится обсуждение результатов вытяжки МВС с использованием регулируемого нагрева верхней части заготовки в двух режимах. Как видно на рис. 10б, рабочий диапазон расстояний для изготовленного нагревателя составляет около 31 см. Этот диапазон соответствует примерно 800 м вытянутого МВС при диаметре заготовки ~6 мм. Простой расчет показывает, что из заготовки диаметром 8 мм можно изготовить более 1200 м МВС стандартного диаметра 125 мкм.

С практической (прикладной) точки зрения помимо параметров трансформации  $k$  определенный интерес представляют структурные, а также измеряемые физические параметры МВС, получаемых в процессе вытяжки рассматриваемым методом. На рис. 11 представлена зависимость средней величины зазоров  $Z$  (см. рис. 2б) от положения заплавленного торца заготовки  $\ell$ .

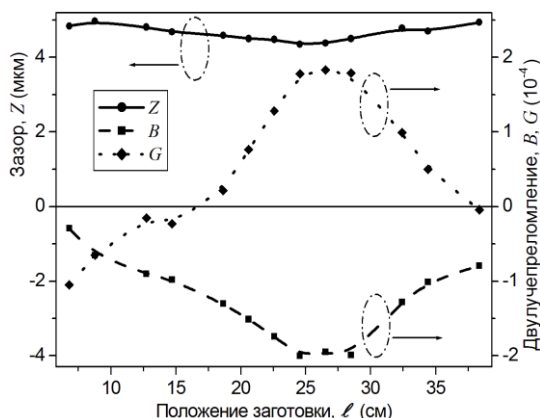


Рис. 11. Измеренная зависимость величины зазора  $Z$  между отверстиями первого слоя ДМВС\_07, а также рассчитанные зависимости фазового ( $B$ ) и группового ( $G$ ) двулучепреломления от положения заплавленного торца заготовки  $\ell$ .

Также был проведен численный эксперимент, в котором измеренные геометрические параметры изготовленного ДМВС\_07 были уменьшены в 3,3 раза. Это эквивалентно выполнению еще одной операции нахлопывания кварцевой трубки на заготовку и вытяжке ДМВС с соответствующими параметрами. Для такого ДМВС были рассчитаны величины фазового ( $B$ ) и группового ( $G$ ) двулучепреломления, которые также представлены на рис. 11. Стоит подчеркнуть, что рассчитанная зависимость фазового двулучепреломления  $B$  показывает прямую корреляцию с вариациями величины зазора  $Z$ , а для величины группового двулучепреломления  $G$  получился знакопеременный характер вариации вдоль ДМВС.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**В заключении** диссертационной работы приведены основные научные результаты диссертации:

1. Предложен новый дизайн двулучепреломляющих микроструктурированных волоконных световодов (ДМВС), содержащих одну или две пары отверстий в первом слое вокруг сердцевины, расположенных на увеличенном расстоянии друг от друга по сравнению с остальными парами отверстий. Проведены численные расчеты двулучепреломляющих характеристик разных вариантов предложенных ДМВС. Показано, что предложенный дизайн позволяет получить большое двулучепреломление ( $4,2 \times 10^{-3}$ ) при равных размерах моды по двум ортогональным координатам.
2. Изготовлены несколько экспериментальных образцов ДМВС с большой величиной двулучепреломления (до  $2,9 \times 10^{-3}$ ) и весьма близкими размерами моды по двум ортогональным координатам (1,65 и 1,56 мкм). Предложена модельная структура ДМВС, обладающая наилучшей точностью описания формы сердцевины световода при относительной геометрической простоте. Получено хорошее совпадение измеренных и рассчитанных с помощью этой модели величин двулучепреломления для разных образцов изготовленных ДМВС.
3. Проведен теоретический анализ эффекта авторегулирования давления в отверстиях (АРДО) при изготовлении МВС из заготовок с заплавленным верхним торцом, получена аналитическая модель, описывающая трансформацию геометрической структуры МВС в этом процессе, определены основные физические факторы, влияющие на проявления эффекта АРДО. Ключевыми параметрами модели являются отношение температуры в вытяжной печи к температуре верхней части заготовки, площадь отверстий в МВС и скорость вытяжки.
4. Экспериментально исследованы проявления эффекта АРДО при изготовлении различных образцов МВС. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими оценками, показывая корреляцию измеренной степени трансформации геометрической структуры МВС в процессе вытяжки с измеренным профилем температуры верхней части заготовки. Также продемонстрировано, что аналитическая модель дает корректную оценку зависимости степени трансформации геометрической структуры от площади отверстий в МВС.
5. Впервые предложен и экспериментально исследован способ активного управления эффектом АРДО в процессе изготовления МВС с помощью регулируемого нагрева верхней части заготовки с разными профилями температуры вдоль нее. На примере вытяжки ДМВС с отверстиями разного размера показано, что с помощью такого способа возможно изготовление длинных МВС (более 1 км) со стабильными параметрами, а также с меняющимися по длине световода параметрами.

#### IV. Список публикаций автора по теме диссертационной работы

1. A.N. Denisov, A.E. Levchenko, S.L. Semjonov, and E.M. Dianov, "Microstructured fiber with high birefringence and low mode field non-circularity," Proc. SPIE **7914**, 79142G-1–12 (2011).
2. А.Н. Денисов, А.Е. Левченко, С.Л. Семенов, Е.М. Дианов, "Микроструктурированные волоконные световоды с большим двулучепреломлением и малой асимметрией поля моды", Квант. электроника **41**, 243–248 (2011).
3. Е.М. Дианов, А.Н. Денисов, С.Л. Семенов, А.Е. Левченко, А.Ф. Косолапов, "Двулучепреломляющий микроструктурированный волоконный световод с низкой асимметрией поля моды", Патент России №2465622, приоритет 04 октября 2010 г., зарегистрирован 27 октября 2012 г.
4. S.L. Semjonov, A.N. Denisov, and A.K. Senatorov, "Fabrication of microstructured fibers from preforms with sealed top-end holes," Proc. SPIE **8961**, 896129-1–10 (2014).
5. Е.М. Дианов, А.Н. Денисов, С.Л. Семенов, "Способ изготовления микроструктурированных волоконных световодов", Патент России №2530477, приоритет 18 января 2013 г., зарегистрирован 13 августа 2014 г.
6. A.N. Denisov, S.L. Semjonov, M.S. Astapovich, and A.K. Senatorov, "Highly Birefringent Microstructured Fibers with Low Mode Asymmetry," J. Lightwave Technol. **33**, 5184–5194 (2015).
7. А.Н. Денисов, А.Ф. Косолапов, А.К. Сенаторов, П.Е. Пальцев, С.Л. Семенов, "Изготовление микроструктурированных волоконных световодов методом вытяжки из заготовок с запаянным верхним торцом", Квант. электроника **46**, 1031–1039 (2016).
8. А.Н. Денисов, А.Е. Левченко, С.Л. Семенов, Е.М. Дианов, "Двулучепреломляющие микроструктурированные световоды с низкой асимметрией поля моды", IX Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи "Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение" (ВМНШ-2010), 5–8 октября 2010 года, г. Саранск, Сб. трудов, стр. 153 (2010).
9. A. Denisov, A. Levchenko, S. Semjonov, and E. Dianov, "Highly birefringent microstructured fibers with low mode field asymmetry," in *CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper CE\_P32.
10. А.Н. Денисов, А.Е. Левченко, С.Л. Семенов, Е.М. Дианов, "Анализ и оптимизация модельных структур двулучепреломляющих микроструктурированных волоконных световодов", ФОТОН-ЭКСПРЕСС (СПЕЦВЫПУСК - Тезисы докладов ВКВО 2011), №6, 155–156 (2011).

11. S.L. Semjonov, A.N. Denisov, and E.M. Dianov, "Fabrication of microstructured fibers using an effect of pressure self-regulation in sealed holes," in *Specialty Optical Fibers, OSA Techn. Digest* (Optical Society of America, 2012), paper STu1D.4.
12. А.Н. Денисов, А.Е. Левченко, С.Л. Семенов, М.С. Астапович, Е.М. Дианов, "Двулучепреломляющие микроструктурированные волоконные световоды с малой асимметрией моды", ФОТОН-ЭКСПРЕСС (СПЕЦВЫПУСК - Тезисы докладов ВКВО 2013), №6, 112–113 (2013).
13. С.Л. Семенов, А.Н. Денисов, П.Е. Пальцев, А.К. Сенаторов, "Изготовление микроструктурированных волоконных световодов методом вытяжки из заготовок с запаянным верхним торцом", ФОТОН-ЭКСПРЕСС (СПЕЦВЫПУСК - Тезисы докладов ВКВО 2013), №6, 123–125 (2013).
14. С.Л. Семенов, А.Н. Денисов, А.Ф. Косолапов, А.К. Сенаторов, "Вытяжка микроструктурированных световодов из заготовок с запаянным верхним торцом при их дополнительном нагреве", ФОТОН-ЭКСПРЕСС (СПЕЦВЫПУСК - Тезисы докладов ВКВО 2015), №6, 121–122 (2015).

#### V. Список цитируемой литературы

1. A. Ortigosa-Blanch, J.C. Knight, W.J. Wadsworth, J. Arriaga, B.J. Mangan, T.A. Birks, and P. St. J. Russell, "Highly birefringent photonic crystal fibers," *Opt. Lett.* **25**, 1325–1327 (2000).
2. K. Suzuki, H. Kubota, S. Kawanishi, M. Tanaka, and M. Fujita, "Optical properties of a low-loss polarization maintaining photonic crystal fiber," *Opt. Express* **9**, 676–680 (2001).
3. C. Xiong and W.J. Wadsworth, "Polarized supercontinuum in birefringent photonic crystal fibre pumped at 1064 nm and application to tuneable visible/UV generation," *Opt. Express* **16**, 2438–2445 (2008).
4. H.Y. Fu, A.C.L. Wong, P.A. Childs, H.Y. Tam, Y.B. Liao, C.Lu, and P.K.A. Wai, "Multiplexing of polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometric sensors," *Opt. Express* **17**, 18501–18512 (2009).
5. N. Song, W. Cai, J. Song, J. Jin, and C. Wu, "Structure optimization of small-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber for mini coil of spaceborne miniature fiber-optic gyroscope," *Appl. Opt.* **54**, 9831–9838 (2015).
6. L. Labonte, E. Pone, M. Skorobogatiy, N. Godbout, S. Lacroix, and D. Pagnoux, "Analysis of the birefringence of solid-core air-silica microstructured fibers," *Proc. SPIE* **7357**, 73570N (2009).
7. Z. Sun, N. Song, J. Jin, J. Song, and P. Ma, "Low loss fusion splicing polarization-maintaining photonic crystal fiber and conventional polarization-maintaining fiber," *Opt. Fiber Technol.* **18**, 452–456 (2012).

8. A.D. Fitt, K. Furusawa, T.M. Monro, and C.P. Please, “Modeling the fabrication of hollow fibers: Capillary drawing,” *J. Lightwave Technol.* **19**, 1924–1931 (2001).
9. M.J. Chen, Y.M. Stokes, P. Buchak, D.G. Crowdy, H.T.C. Foo, A. Dowler, and H. Ebendorff-Heidepriem, “Drawing tubular fibres: experiments versus mathematical modeling,” *Opt. Mater. Express* **6**, 166–180 (2016).
10. M.J. Chen, Y.M. Stokes, P. Buchak, D.G. Crowdy, and H. Ebendorff-Heidepriem, “Microstructured optical fibre drawing with active channel pressurisation,” *J. Fluid Mech.* **783**, 137–165 (2015).
11. D.J. DiGiovanni, A.M. Vengsarkar, J.L. Wagener, and R.S. Windeler, “Article comprising a microstructured optical fiber, and method of making such fiber,” U.S. Patent 5802236 (1998).
12. C.J. Voyce, A.D. Fitt, J.R. Hayes, and T.M. Monro, “Mathematical Modeling of the Self-Pressurizing Mechanism for Microstructured Fiber Drawing,” *J. Lightwave Technol.* **27**, 871–878 (2009).
13. М.В. Греков, С.А. Васильев, И.Г. Королев, А.С. Божков, О.И. Медведков, А.К. Сенаторов, “Прибор для измерения углового распределения выходного излучения волоконных световодов”, ПТЭ №1, 112–118 (2005).