

УДК 681.7.068

И. В. Шилова

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ С ЦЕЛЬЮ ПОСТРОЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

UDC 681.7.068

I. V. Shilova

INVESTIGATION OF PROPERTIES OF MICROSTRUCTURED FIBERS FOR CONSTRUCTION OF MECHANICAL SENSORS

Аннотация

Приведены результаты исследования потерь излучения в трех различных типах микроструктурных волоконных световодов при одностороннем боковом сжатии, при изменении радиуса изгиба, а также исследования зависимости угла поворота плоскости поляризации при одностороннем боковом сжатии. Произведен расчет потерь излучения в микроструктурных волоконных световодах при одностороннем боковом сжатии.

Ключевые слова:

микроструктурный волоконный световод, микроструктурированный волоконный световод, фотонно-кристаллический волоконный световод, волоконно-оптический датчик.

Abstract

The paper presents investigations of radiation losses in three types of microstructured optical fibers under one-sided lateral contraction, by changing a bending radius, and investigations of Faraday rotation angle dependence in case of one-sided lateral contraction. The calculation of radiation losses in microstructured optical fibers under one-sided lateral contraction was made.

Key words:

microstructural optical fiber, microstructured optical fiber, photonic crystal optical fiber, optical fiber sensor.

Введение

В промышленности Республики Беларусь существует ряд задач измерения давления, деформации, температуры и других физических величин информационно-измерительными системами во взрыво- и пожароопасных условиях, а также в условиях воздействия высокого уровня электромагнитных полей [1].

Высокий уровень электромагнитных полей создает помехи и наводки в традиционных датчиках с электрическим выходным сигналом. Это затруд-

няет их практическое применение. Наиболее оптимально и экономически целесообразно решать эти задачи путем конструирования волоконно-оптических датчиков, имеющих ряд преимуществ по сравнению с традиционными электрическими: являются взрыво- и искробезопасными; имеют небольшие габариты и вес, высокую механическую прочность, простую конструкцию, т. е. повышенную надежность; изготавливаются из диэлектрических материалов, следовательно, обеспечивают электробезопасность; химически инертны; устой-

чивы к вибрациям, механическим ударам, повышенным и пониженным температурам; потребляют небольшое количество энергии; позволяют производить дистанционные измерения [2–5].

Перспективное направление волоконной оптики – разработка и исследование волоконных световодов с новыми свойствами. Одним из типов таких световодов являются микроструктурные (или микроструктурированные, или фотонно-кристаллические) волоконные световоды (МСВС), которые имеют в сердцевине цилиндрические полости, параллельные оси волоконного световода [6–9]. Подобное строение световедущей сердцевины придает микроструктурным световодам, по сравнению с обычными, ряд новых свойств [6–8].

Микроструктурные волоконные световоды имеют стоимость, значительно превышающую стоимость обычных многомодовых. Изготовление микроструктурных волоконных световодов становится всё более массовым, что со

временем удешевит их производство. Такие световоды широко исследуются во всем мире, в основном, с научными целями [6–9]. В работе сделан акцент на прикладном применении микроструктурных волокон: проанализированы волоконно-оптические первичные преобразователи различных физических величин на основе МСВС.

Образцы для исследования

Были исследованы возможности построения первичных преобразователей на основе трёх типов микроструктурных волоконных световодов: трёхслойного, четырёхслойного и пятислойного (т. е. с тремя, четырьмя и пятью слоями воздушных дырок, расположенных по гексагональной структуре), поперечные сечения которых представлены на рис. 1. Диаметр кварцевой оболочки равен 125 мкм, а диаметр упрочняющей полимерной оболочки – 245 мкм.

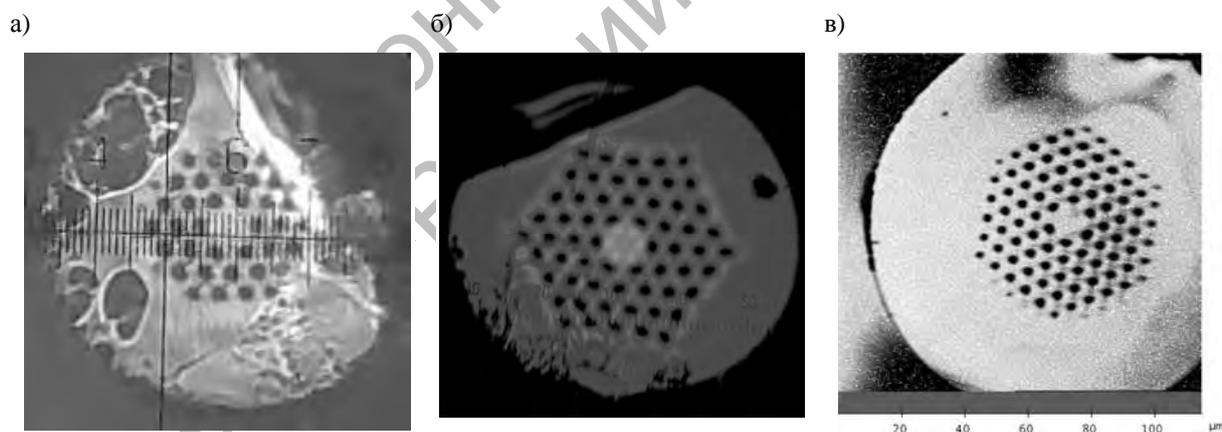


Рис. 1. Поперечное сечение микроструктурных волоконных световодов различных типов: а – МСВС 1-го типа (трёхслойный МСВС); б – МСВС 2-го типа (четырёхслойный МСВС); в – МСВС 3-го типа (пятислойный МСВС)

Исследование потерь излучения в микроструктурных волоконных световодах при одностороннем боковом сжатии

Был проведен расчет деформаций и напряжений (связанных с показателем

преломления) волоконных световодов при односторонней боковой нагрузке методом конечных элементов с помощью программы Ansys mechanical CFD. Размеры при построении модели были заданы в 10000 раз больше оригинала.

Прикладываемая сила составляла 1 Н. Поскольку исследуемые нагрузки находятся в зоне упругости, то полученные напряжения будут увеличиваться прямо пропорционально приложенной силе.

Для трёхслойного и пятислойного микроструктурных волоконных световодов были получены распределения напряжений по поперечному сечению, представленные на рис. 2 и 3.

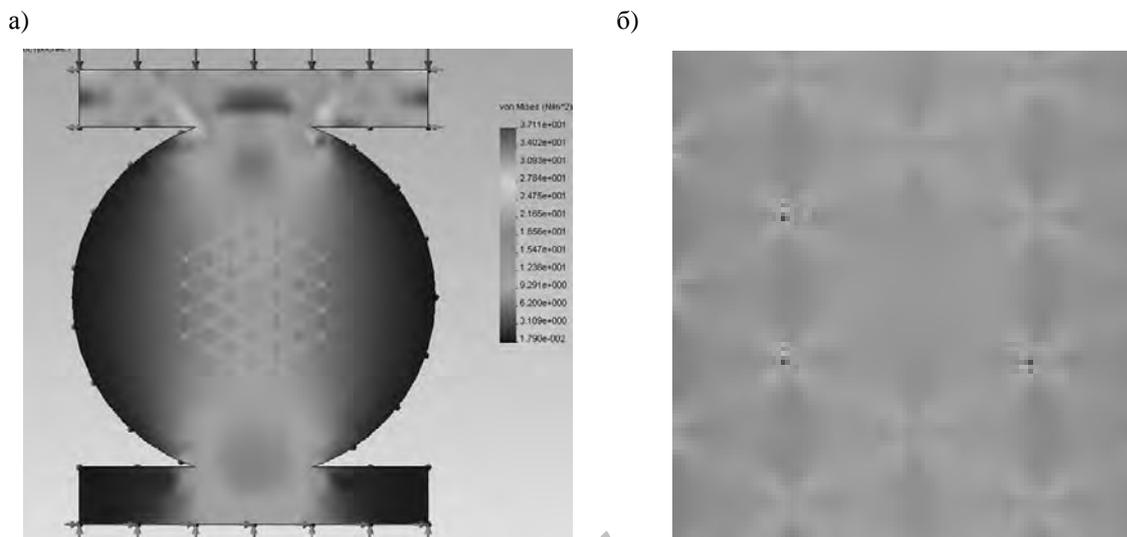


Рис. 2. Распределение напряжений по поперечному сечению для трёхслойного МСВС: а – общая картина; б – увеличенная центральная часть световода

Был проведен расчет микроструктурных волоконных световодов на одностороннее боковое сжатие, из которого видно, что при одностороннем боковом сжатии микроструктурного волоконного световода в области цилиндрических отверстий в сердцевине световода механические напряжения образуют дополнительную объемную фазовую решетку. Выдвинуто предположение, что на этой решетке будет рассеиваться излучение, распространяющееся по световоду, вследствие чего МСВС будет иметь более высокую чувствительность к одностороннему боковому сжатию, чем обычные волоконные световоды. Расчеты по распределению напряжений в сердцевине пятислойного МСВС были

проведены для различной ориентации шестигранника из воздушных дырок для сравнения получаемых картин распределения напряжений (см. рис. 3, б–г). Более светлые области в сердцевине световода на рис. 2 и 3 отображают большие механические напряжения. Сравнивая рис. 3, б–г, можно сказать, что объемная фазовая решетка из напряжений присутствует при всех ориентациях шестигранника из воздушных дырок, и рисунок этой решетки меняется незначительно.

Было рассчитано изменение показателя преломления для трёхслойного и пятислойного МСВС, используя следующие формулы [10]:

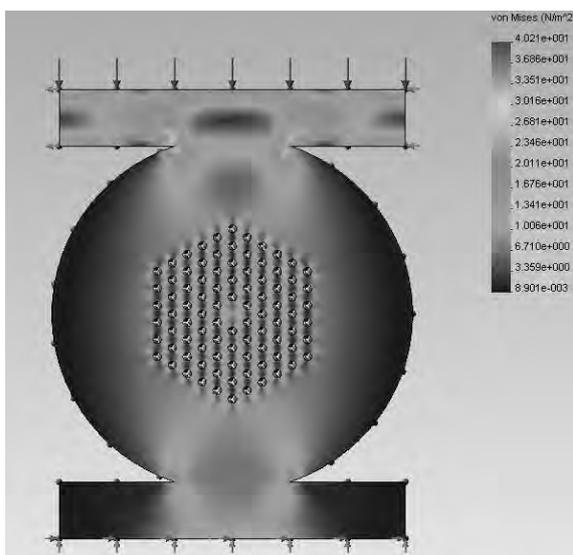
$$(\Delta n_{eff})_x = -\frac{n_0^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_x + [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_y + \sigma_z) \}; \quad (1)$$

$$(\Delta n_{eff})_y = -\frac{n_0^3}{2E} \{ (p_{11} - 2\nu p_{12}) \sigma_y + [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}] (\sigma_x + \sigma_z) \}, \quad (2)$$

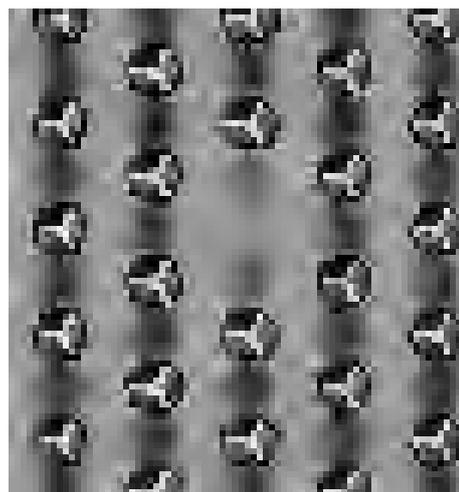
где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – составляющие на-

пряжения по осям OX, OY, OZ соответственно.

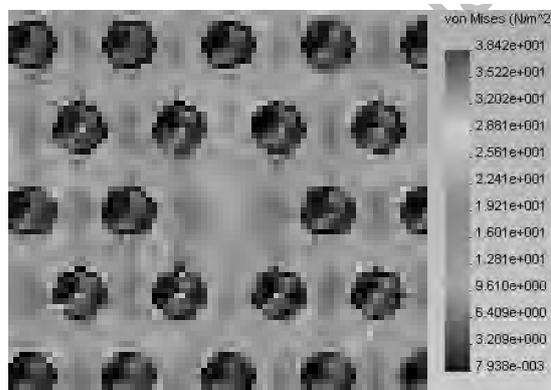
а)



б)



в)



г)

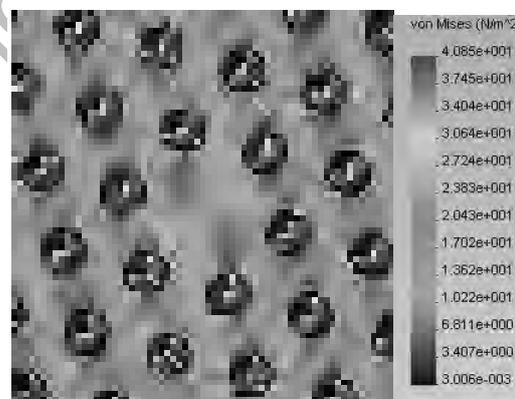


Рис. 3. Распределение напряжений по поперечному сечению для пятислойного МСВС при трех разных направлениях его нагружения: а – нагрузка приложена под углом 120° к грани шестиугольника из дырок; б – нагрузка приложена под углом 120° к грани шестиугольника из дырок (увеличенная центральная часть световода); в – нагрузка приложена под углом 90° к грани шестиугольника из дырок (увеличенная центральная часть световода); г – нагрузка приложена под углом 105° к грани шестиугольника из дырок (увеличенная центральная часть световода)

Для волоконных световодов $E = 74,52$ ГПа, $p_{11} = 0,121$; $p_{12} = 0,270$, $\nu = 0,17$.

Проведенные расчеты дали следующие значения:

– для трехслойного МСВС

$(\Delta n_{eff})_x = 4,53 \cdot 10^{-7}$ при нагрузке 1 Н; $(\Delta n_{eff})_x = 2,04 \cdot 10^{-5}$ при нагрузке 45 Н;

$(\Delta n_{eff})_y = 3,93 \cdot 10^{-7}$ при нагрузке 1 Н; $(\Delta n_{eff})_y = 1,77 \cdot 10^{-5}$ при нагрузке 45 Н;

– для пятислойного МСВС
 $(\Delta n_{eff})_x = 1,18 \cdot 10^{-6}$ при нагрузке
 1 Н; $(\Delta n_{eff})_x = 1,18 \cdot 10^{-5}$ при нагрузке
 10 Н;

$(\Delta n_{eff})_y = 1,03 \cdot 10^{-6}$ при нагрузке
 1 Н; $(\Delta n_{eff})_y = 1,03 \cdot 10^{-5}$ при нагрузке
 10 Н.

Таким образом, в пятислойном МСВС изменение показателя преломления при одинаковой нагрузке в 2,6 раза выше, чем в трёхслойном. Выдвинуто

предположение, что в связи с вышеизложенными расчетами потери излучения при сжатии пятислойного МСВС будут больше.

Были проведены экспериментальные исследования зависимости выходного сигнала от величины нагрузки для микроструктурных и стандартного многомодового световодов. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

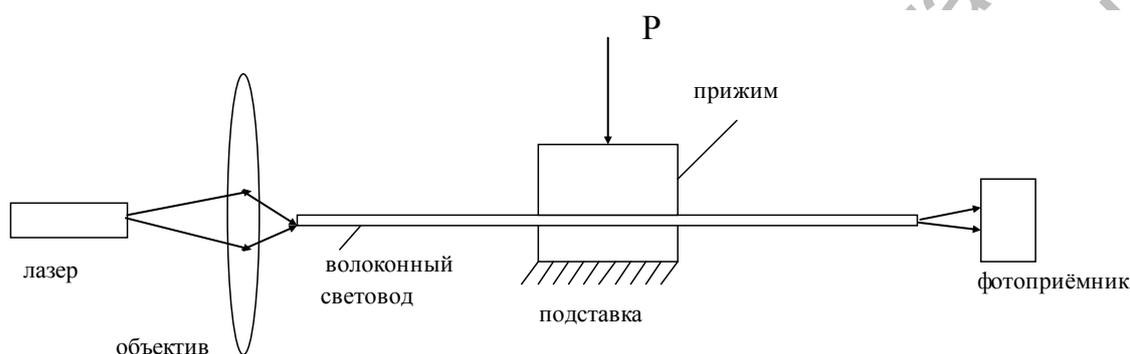


Рис. 4. Схема эксперимента для исследования потерь излучения от величины нагрузки на световод

Измерения проводились следующим образом. Излучение полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм посредством восьмикратного микрообъектива вводилось в исследуемые световоды и регистрировалось на их выходе оптическим ваттметром OM3-65. Усилие наводилось с помощью предварительно откалиброванной пружины. Длина прижима равна 85 мм.

Для сравнения использовали обычный стандартный многомодовый волоконный световод (ОВС), который имел следующие параметры: диаметр кварцевой сердцевины равен 50 мкм, диаметр кварцевой оболочки – 125 мкм, а диаметр упрочняющей полимерной оболочки – 245 мкм.

Результаты экспериментов представлены на рис. 5.

Измерения показали, что пятислойный микроструктурный волоконный световод имеет большую чувстви-

тельность к одностороннему боковому сжатию, чем трёхслойный, а тот, в свою очередь, более чувствителен к одностороннему боковому сжатию, чем многомодовый волоконный.

Сплошными линиями аппроксимированы экспериментальные результаты следующими функциями:

– для многомодового волоконного световода

$$O_p = -0,0015F + 1,0068; \quad (3)$$

– для трёхслойного МСВС

$$O_p = -0,0072F + 0,9881. \quad (4)$$

Для пятислойного МСВС сплошной линией показан средний результат по восьми измерениям.

Зависимость выходного сигнала от величины нагрузки для трёхслойного МСВС имеет линейный характер, а для пятислойного – близкий к линейному на некоторых участках.

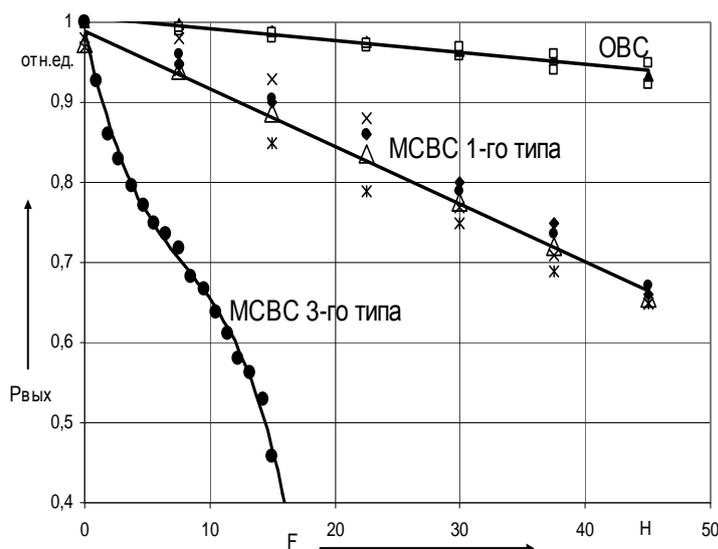


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала от величины нагрузки для МСВС 1-го и 3-го типов и для обычного многомодового волоконного световода

Эксперименты показали, что чувствительность многомодового волоконного световода к одностороннему боковому сжатию составляет 0,11 %/Н, чувствительность МСВС 1-го типа – 0,78 %/Н, чувствительность МСВС 3-го типа – 3,67 %/Н, т. е. чувствительность пятислойного МСВС к одностороннему боковому сжатию в 4,7 раза выше, чем у трёхслойного, и в 33 раза выше, чем у многомодового [11, 12].

Таким образом, наблюдаемый эффект можно использовать для построения амплитудных волоконно-оптических датчиков силы на основе микроструктурных оптических волокон с простой конструкцией.

Исследование потерь излучения в микроструктурных волоконных световодах при изменении радиуса изгиба

Были исследованы зависимости образцов микроструктурных световодов всех трех типов от радиуса изгиба. Для определения влияния длины волны

распространяющегося по МСВС излучения использовались три лазерных источника с длинами волн 633, 532 и 405 нм. В качестве приемника излучения применялся ваттметр оптический поглощаемой мощности ОМЗ-65. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 6.

В качестве эталонов кривизны применялся набор цилиндров.

В результате были получены зависимости, графики которых представлены на рис. 7, а–в. Каждый график – это усредненный результат по восьми измерениям. Для сравнения также была исследована зависимость выходного сигнала от радиуса изгиба для стандартного многомодового волоконного световода, имеющего следующие параметры: диаметр сердцевины – 50 мкм, диаметр кварцевой оболочки – 125 мкм, диаметр упрочняющей полимерной оболочки – 250 мкм. Она представлена на рис. 7, г. Каждый график – это усредненный результат по шести измерениям.

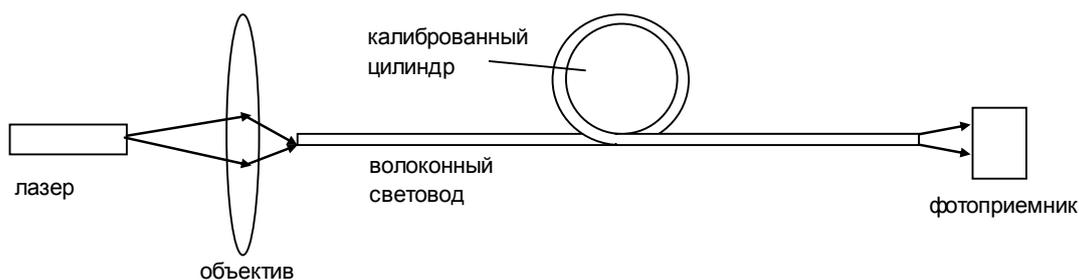


Рис. 6. Схема эксперимента для исследования зависимости выходного сигнала от радиуса изгиба световода

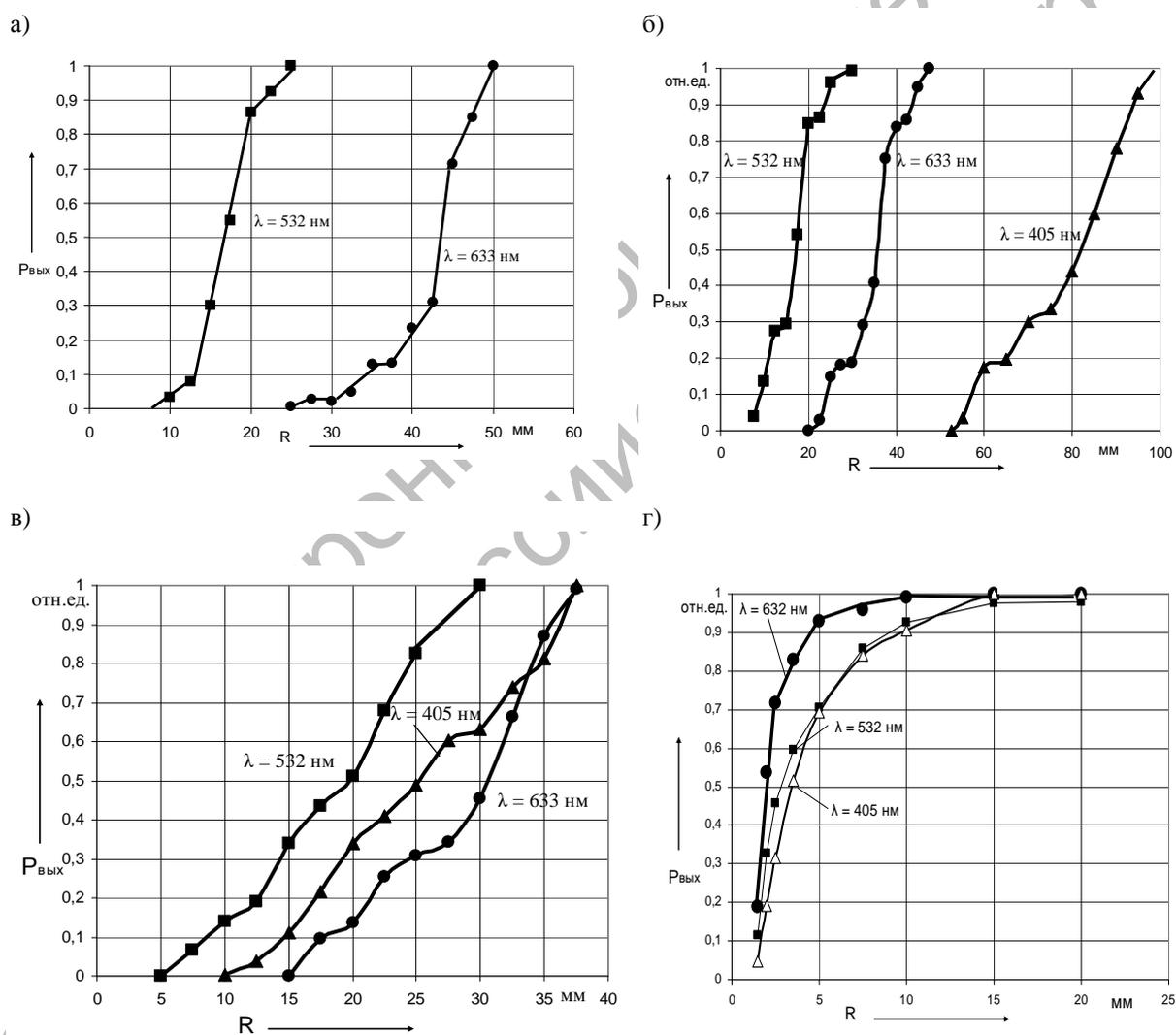


Рис. 7. Зависимость выходного сигнала от радиуса изгиба: а – для трёхслойного МСВС; б – для четырёхслойного МСВС; в – для пятислойного МСВС; г – для многомодового волоконного световода

Из рис. 7, а–в можно сделать вывод, что в большинстве графиков зависимости выходного сигнала от изменения радиуса изгиба для различных микроструктурных волоконных световодов имеются «ступеньки», которые свидетельствуют о том, что по этим волокнам распространяется более одной моды. Это затрудняет применение МСВС в чувствительных элементах волоконно-оптических датчиков. Однако на некоторых участках зависимостей есть линейные участки с большой крутизной, которые можно использовать для построения датчиков механических величин: перемещения, силы, давления и т. п. Причем эти участки находятся в диапазоне достаточно больших радиусов изгиба, при которых на волоконный световод действуют нагрузки, не приводящие к его разрушению. Следует отметить, что для пятислойного МСВС эти «ступеньки» в зависимости выходного сигнала незначительны при применении в качестве источников излучения лазеров с различными длинами волн. Но чувствительность меньше, по сравнению с остальными образцами, и составляет 4 %/мм. Для четырехслойного МСВС у всех экспериментальных кривых при использовании лазеров с различными длинами волн наблюдаются «ступеньки», но чувствительность на отдельных участках графика $P_{\text{вых}}(R)$ больше, по сравнению с МСВС других

типов, и составляет 11 %/мм [13].

Из проведенных исследований также можно сделать выводы, что микроструктурные волоконные световоды намного более чувствительны к изменению радиуса изгиба: при радиусе изгиба 5 мм стандартного волоконного световода сигнал падает только на 50 %, в то время как для микроструктурных световодов выходной сигнал при таком радиусе уменьшается до нуля при использовании лазеров с длинами волн видимого диапазона.

Исследование угла поворота плоскости поляризации излучения, прошедшего через микроструктурный волоконный световод, при его одностороннем боковом сжатии

Схема эксперимента для исследования зависимости угла поворота плоскости поляризации излучения от силы, приложенной к микроструктурному волоконному световоду, приведена на рис. 8.

Для МСВС трех типов получили зависимости, представленные на рис. 9.

Проведенные эксперименты показали, что по мере увеличения приложенной силы в общем случае на выходе волоконного световода наблюдается преобразование линейной поляризации лазерного излучения в эллиптическую с поворотом осей эллипса [14].

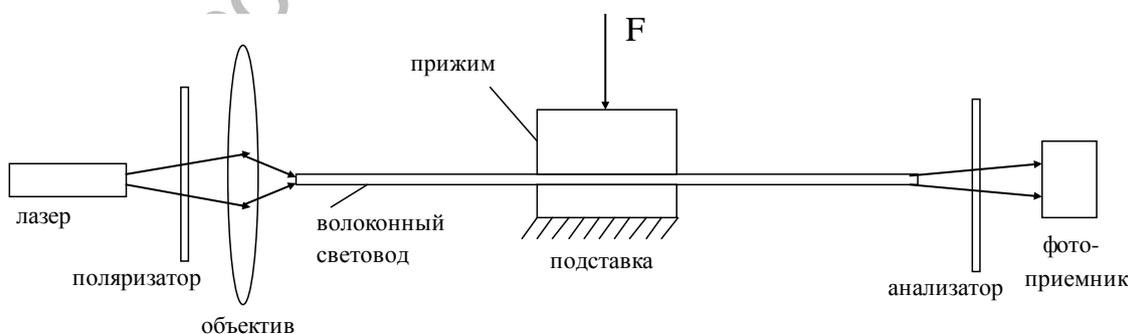


Рис. 8. Схема эксперимента для исследования зависимости угла поворота плоскости поляризации от нагрузки для МСВС

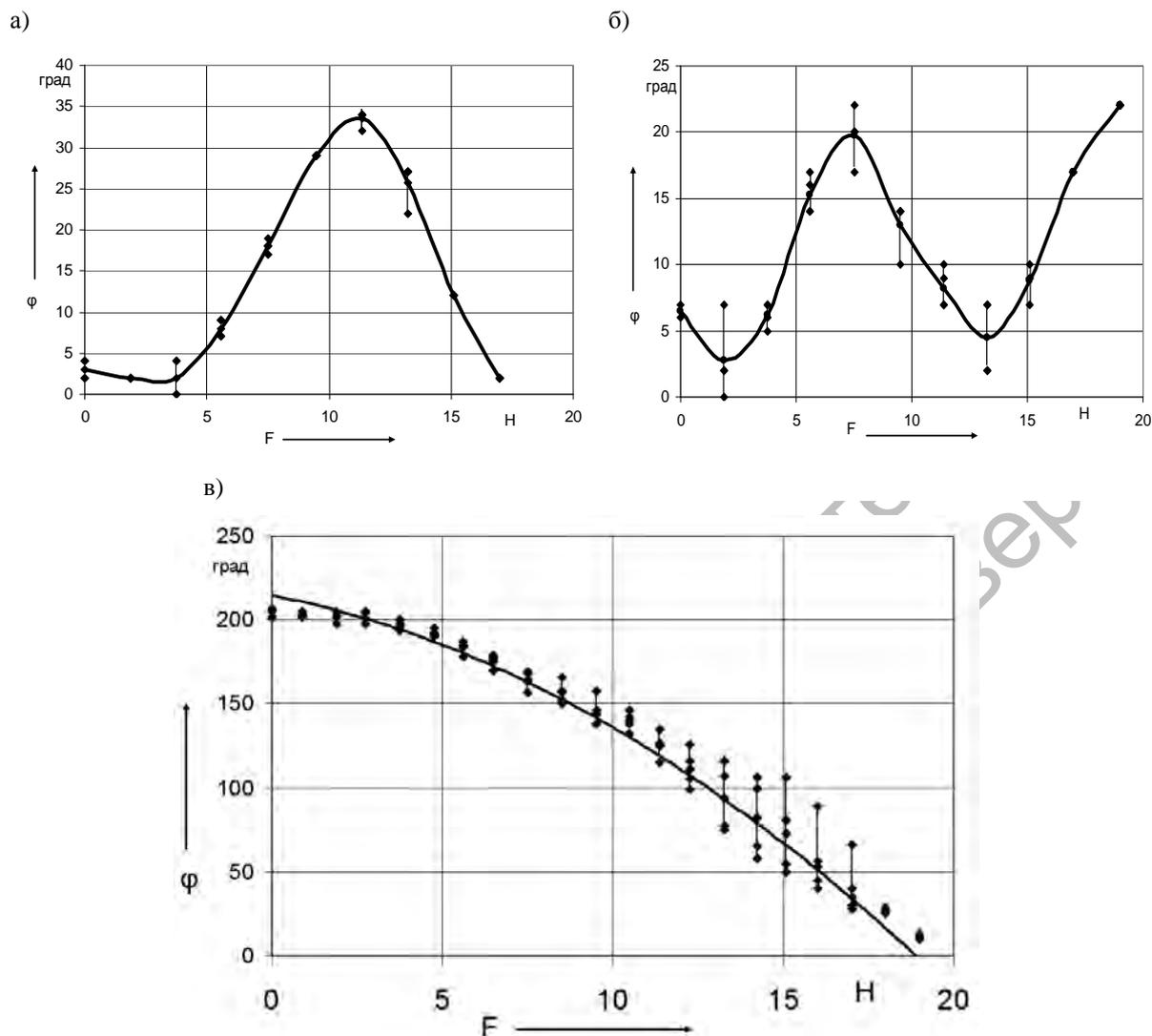


Рис. 9. Зависимость угла поворота плоскости поляризации МСВС от приложенной силы: а – для трёхслойного МСВС; б – для четырёхслойного МСВС; в – для пятислойного МСВС

Зависимость угла поворота плоскости поляризации от приложенной силы в диапазоне от 0 до 20 Н для микроструктурных волоконных световодов всех типов имеет синусоидальный вид.

Поскольку зависимость неоднозначная, то использовать трёхслойный и четырёхслойный МСВС для построения датчиков силы возможно только для небольших диапазонов измеряемой величины.

Зависимость угла поворота плоскости поляризации пятислойного МСВС от приложенной силы от 5 до 20 Н носит квазилинейный характер. Из полу-

ченных экспериментальных зависимостей можно сделать вывод, что для построения датчиков силы предпочтительно использовать пятислойный МСВС.

Заключение

Исследованы потери в специальных микроструктурных волоконно-оптических световодах с ограниченным числом воздушных полостей в оболочке и обычном многомодовом волоконном световоде при одностороннем боковом сжатии. Получена конечно-элементная модель, расчеты по которой показыва-

ют, что при сжатии механические напряжения на перемычках между цилиндрическими отверстиями образуют дополнительную объемную фазовую решетку. Выдвинуто предположение, что эта решетка оказывает влияние на фазовые свойства формирования электромагнитного поля моды световедущей сердцевинны. Анализ подтверждает, что в области сердцевинны показатель преломления становится неоднородным при одностороннем боковом сжатии. Это приводит к дополнительным потерям излучения в микроструктурном волоконном световоде, возрастающим с увеличением усилия сжатия.

Исследованы экспериментально микроструктурные волоконные световоды и стандартный световод как чувствительные элементы амплитудных волоконно-оптических датчиков силы. Экспериментальные исследования показали, что чувствительность пятислойных МСВС к одностороннему боковому сжатию в 4,7 раза выше, чем у трехслойных МСВС, и в 33 раза выше, чем у многомодового световода.

Зависимость выходного сигнала от радиуса изгиба для различных типов МСВС имеет «ступеньки». Есть предположение, что они появляются вслед-

ствие перестройки мод в МСВС, который является одномодовым при большой длине световода порядка 1 км. На небольших длинах такой световод может быть маломодовым. МСВС с тремя и четырьмя слоями воздушных дырок являются более чувствительными к изменению радиуса изгиба, чем пятислойные. Но пятислойные МСВС имеют менее выраженные «ступеньки» в зависимости $P_{вых}(R)$, которая приближена к линейной. Поэтому их удобнее использовать для построения датчиков перемещения, давления, силы и т. д. МСВС всех типов являются более чувствительными к изменению радиуса изгиба, чем многомодовые волоконные световоды.

Проведенные эксперименты показали, что зависимость угла поворота плоскости поляризации микроструктурного волоконного световода от приложенной силы нагрузки имеет вид синусоиды. Для пятислойных МСВС эта зависимость в интервале приложенных сил от 5 до 20 Н имеет характер, близкий к линейному. Поэтому такой тип МСВС лучше всего использовать для построения датчиков силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фрайден, Дж.** Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
2. **Shizhuo, Yin.** Fiber Optic Sensors. Second edition / Yin Shizhuo, Paul B. Ruffin, T. S. Yu Francis. – London ; New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 477 p.
3. **Бусурин, В. И.** Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
4. Волоконно-оптические датчики : пер. с яп. / Т. Окоси [и др.] ; под ред. Т. Окоси. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
5. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. – М. : Техносфера, 2008. – 520 с.
6. Photonic Crystals. Molding the Flow of light. Second edition / J. D. Joannopoulos [et al.]. – Princeton : Princeton University Press, 2008. – 305 p.
7. **Желтиков, А. М.** Микроструктурированные световоды в оптических технологиях / А. М. Желтиков. – М. : Физматлит, 2009. – 192 с.
8. **Борисов, В. И.** Некоторые направления развития оптики и технических применений волоконных световодов / В. И. Борисов, И. В. Шилова // Оптика неоднородных структур : материалы Респ. науч.-практ. конф. – Могилев : МГУ им. А. А. Кулешова, 2004. – С. 3–5.

9. **Minkovich, U.** Special photonic crystal fibers. Modeling, fabrication and application / U. Minkovich // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2011. – 74 p.

10. Experimental analysis of birefringence effect on fiber Bragg induced by lateral compression / Zhao Jingxi [et al.] // Optics Communications. – 2004. – № 229. – P. 203–207.

11. **Shilova, I. V.** Microstructured optical fiber losses in case of one-sided lateral contraction / I. V. Shilova // IEEE Laser Physics and Laser Technologies (RCSLPLT) and 2010 Academic Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology (ASOT), 2010 10th Chinese-Russian Symposium on Laser Physics and Laser Technologies. – 2010. – P. 277–279.

12. **Шилова, И. В.** Наведенные потери в микроструктурных волоконных световодах при одностороннем боковом сжатии / И. В. Шилова // Оптика неоднородных структур : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Могилев, 16–17 февр. 2011 г. – Могилев, 2011. – С. 295–298.

13. **Шилова, И. В.** Влияние изгиба на потери излучения в микроструктурных волоконных световодах / И. В. Шилова, А. А. Аксёнова, Е. М. Полянская // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 30–31 окт. 2012 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – С. 176.

14. **Борисов, В. И.** Влияние механических давлений на распространение света в волоконных световодах / В. И. Борисов, В. П. Минкович, И. В. Шилова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев 22–23 апр. 2004 г. : в 2 ч. – Могилев, 2004. – Ч. 2. – С. 248.

Статья сдана в редакцию 13 апреля 2015 года

Ирина Владимировна Шилова, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: irina.schilova@tut.by.

Irina Vladimirovna Shilova, senior lecturer, Belarusian-Russian University. E-mail: irina.schilova@tut.by.