

А. О. ВОЗНЕСЕНСКАЯ

АМПЛИТУДНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования амплитудного волоконно-оптического преобразователя отражательного типа для датчика давления.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, датчик давления.

Введение. В настоящее время интенсивно развиваются автоматизированные системы контроля и управления различными технологическими процессами. Функционирование таких систем требует использования надежных высокоточных датчиков для измерения различных физических величин. В настоящее время для решения этой задачи все более широко применяются волоконно-оптические датчики (ВОД), которые позволяют с высокой точностью измерять разнообразные физические величины (температуру, давление, перемещение, вибрацию, акустические волны, электрические и магнитные поля, уровень жидкости и др.) и, кроме того, обладают малыми габаритами, массой, они невосприимчивы к электромагнитным помехам, а также совместимы с современными волоконно-оптическими системами передачи информации [1, 2].

Для использования в измерительной технике наиболее подходят ВОД с амплитудной модуляцией светового сигнала, которые от фазовых и поляризационных ВОД отличаются наиболее простой и технологичной конструкцией и требуют минимальных материальных и временных затрат на монтаж и эксплуатацию. Во многих типах амплитудных ВОД воздействия приводят к изменению положения или формы подвижного (или деформирующегося) элемента волоконно-оптического преобразователя (ВОП), это, в свою очередь, вызывает изменение (модуляцию) выходного оптического сигнала ВОД [3]. Таким образом, обеспечиваются удобная для последующей обработки форма представления информации и однозначная взаимосвязь входной и выходной величин.

Численная модель ВОП. Традиционно в задачах оптического согласования изменение оптических потерь ВОП $A=f(z)$ при изменении расстояния z между оптическими волокнами и отражающим элементом рассчитывают по приближенным формулам, приведенным, например, в работах [4, 5], при этом рассматривается только случай равномерно освещенного плоского отражающего элемента:

$$A = -10 \lg \left[\frac{1}{1 + 2 \left(\frac{z}{2a} \right) \operatorname{tg}(\arcsin(NA))} \right]^2, \quad A = -10 \lg \left[\frac{a}{a + 2z(NA)} \right]^2,$$

где a — радиус сердцевины оптического волокна, NA — его числовая апертура.

Следует отметить, что приближенные формулы применимы только при малых значениях z [3]. Тем не менее при проектировании ВОП необходимо получить универсальную модель, позволяющую рассчитывать функции пропускания преобразователей различной геометрии, в том числе ВОП, имеющих отражающий элемент с различными радиусами кривизны поверхности R . В модели должны быть учтены особенности волноводного распространения оптического излучения.

Как правило, в схемах амплитудных ВОП используются многомодовые оптические волокна, что позволяет сформировать численную модель ВОП в геометрическом приближении. Расчет оптических потерь ВОП производился методом элементарных площадок [3]. Поверхность торца входного оптического волокна разбивалась на ряд элементарных площадок $M \times N$. При этом предполагалось, что каждой площадкой излучается световой конус, определяемый числовой апертурой волокна. Внутри каждого светового конуса формируется W лучей, различающихся направлением и имеющих равную световую энергию j_{0i} , при равномерном распределении интенсивности на торце входного оптического волокна. Для каждого i -го входного луча, отраженного от поверхности оптического элемента, определялись координаты (x'_i, y'_i) точки пересечения с плоскостью торца приемного оптического волокна и затем лучи, попавшие в каждую площадку с координатами центра (x'_m, y'_n) , суммировались. Оптические потери ВОП рассчитывались следующим образом:

$$A = -10 \lg \left[\frac{\left(\sum_{i=0}^{W' \times M' \times N'} j_i \right)}{\left(\sum_{i=0}^{W \times M \times N} j_{0i} \right)} \right].$$

Здесь j_i — световая энергия, переносимая единичным отраженным лучом при соблюдении двух условий:

1) $x'^2 + y'^2 \leq (2a)^2$ — отраженные лучи попадают в область сердцевины приемного волокна;

2) $0 \leq \sin \theta \leq NA$ — свет распространяется в приемном волокне, где θ — угол падения отраженного луча на торец приемного волокна.

Предполагалось также, что отражающий элемент не вносит дополнительных потерь, т.е. энергия, переносимая единичным лучом, не изменяется при отражении.

С целью нахождения схемы ВОП, обеспечивающей наибольшую чувствительность ВОД $S=dA/dz$ и динамический диапазон измерений ΔA выполнено компьютерное моделирование и произведена оптимизация ВОП, предназначенных для применения в ВОД давления.

Оптимизация ВОП для датчиков давления. Отражающим элементом в ВОП давления служит тонкая плоская мембрана, прогиб которой определяется воздействующим на нее давлением [6]. Таким образом, в ВОП давления изменение оптических потерь происходит как за счет изменения расстояния z при прогибе мембраны, так и за счет изменения радиуса кривизны самой мембраны R . В настоящей работе при компьютерном моделировании

рассматривалась отражающая мембрана из латуни ЛС-68 толщиной $h=0,1$ мм, широко используемая в ВОП для датчиков давления в диапазоне изменений $(0—10) \cdot 10^5$ Па.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости изменения оптических потерь A от изменения расстояния z за счет увеличения кривизны отражающей мембраны $1/R$ для одноволоконных и двухволоконных ВОП отражательного типа для ВОД давления (нормальное атмосферное), установленных на различном расстоянии от отражающей мембраны z_0 , толщина мембраны $h=0,1$ мм, диаметр 15 мм: 1 и 2 — одноволоконный, $2a=50$ мкм, $z_0=1000$ и 3000 мкм соответственно; 3 и 4 — двухволоконный, $2a_{\text{вх}}=50$ мкм, $z_0=1000$ и 3000 мкм. Очевидно отсутствие значительного различия в поведении кривых 1 и 2, а также 3 и 4. Однако при критическом расстоянии $z_{\text{кр}} \sim 500$ мкм для двухволоконного ВОП характерно резкое изменение характеристики, поскольку отраженный свет перестает попадать на торец выходного оптического волокна. Полученные данные показывают, что при малых начальных расстояниях z_0 (1 и 3) характеристика потерь ВОП обеспечивает большую чувствительность $S \sim 0,012$ дБ/мкм, чем при увеличенных начальных расстояниях (2 и 4). В то же время схемы ВОП с увеличенным начальным расстоянием z_0 обеспечивают больший динамический диапазон, а следовательно, позволяют проводить измерения изменения давления в более широком диапазоне.

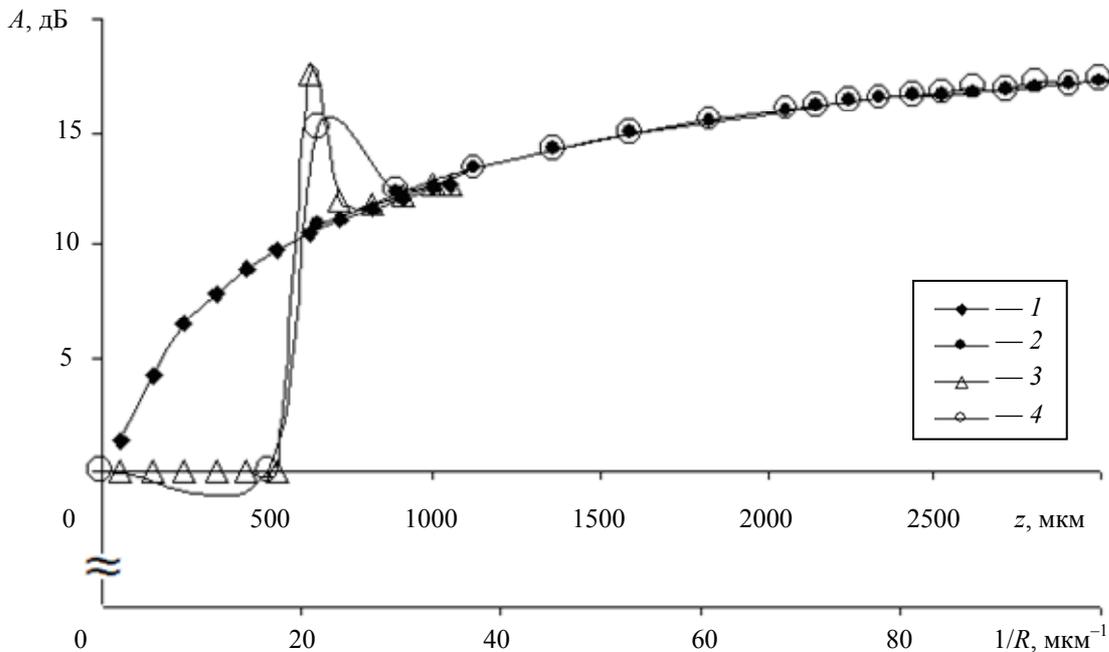


Рис. 1

Экспериментальное исследование пространственной зависимости оптических потерь ВОП и проверка результатов компьютерного моделирования проводились на лабораторном стенде (рис. 2). В качестве источника излучения использовался передающий блок оптического тестера ОТМ-1 на основе лазерного диода ($\lambda=850$ нм), а в качестве измерителя мощности — приемный блок ОТМ-1, включающий $p-i-n$ -фотодиод. На многомодовые оптические волокна с сердцевинной различного диаметра ($2a=100$ и 200 мкм) с одной стороны были установлены оптические соединители. На противоположных свободных торцах волокон были сделаны прецизионные сколы ($90 \pm 1^\circ$). Выровненные волокна попарно закреплялись в держателе, установленном на микропозиционере (Standa 7T801). При помощи микропозиционера осуществлялось продольное (вдоль оси z) перемещение оптических волокон относительно отражающего элемента, при этом регистрировалось изменение мощности выходного оптического

сигнала. Микропозиционер позволял осуществлять перемещение волокон с точностью 5 мкм, измерение оптической мощности проводилось с точностью 0,02 дБ.

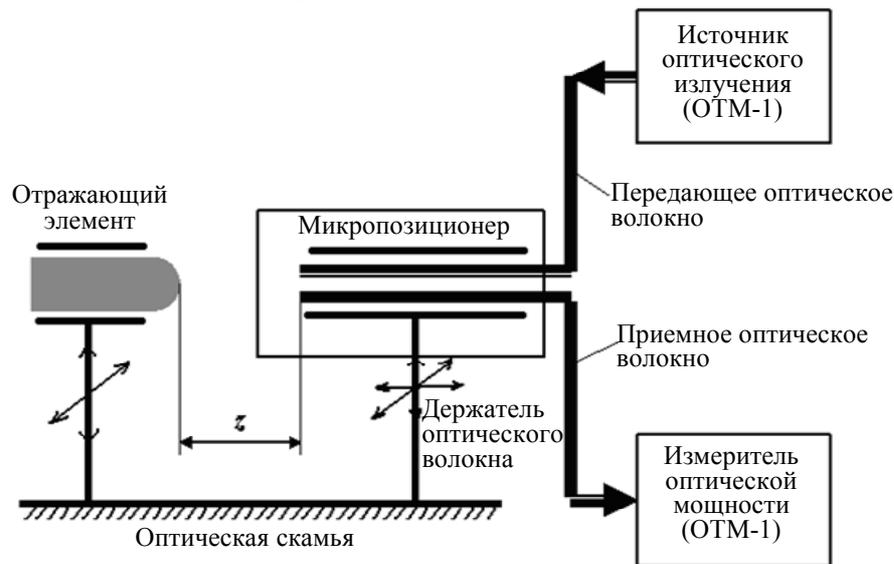


Рис. 2

На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные зависимости изменения оптических потерь ВОП от изменения расстояния z ($z_0 = 300$ мкм) при $R=300$ мкм: 1 — одноволоконный ВОП, $2a = 100$ мкм; 2 — двухволоконный ВОП, $2a=200$ мкм; 3 — двухволоконный ВОП: передающее волокно — $2a=200$, приемное — 100 мкм. Видно, что наибольшей чувствительностью обладают двухволоконные ВОП, у которых передающее и приемное оптические волокна различаются диаметрами сердцевины, а отражающий элемент имеет сферическую поверхность. При этом установлено, что расхождение результатов компьютерного моделирования (кривые) и эксперимента (точки) составило менее 10 % для всех рассмотренных образцов ВОП. Таким образом, предложенная численная модель расчета оптических потерь ВОП хорошо описывает экспериментальные зависимости.

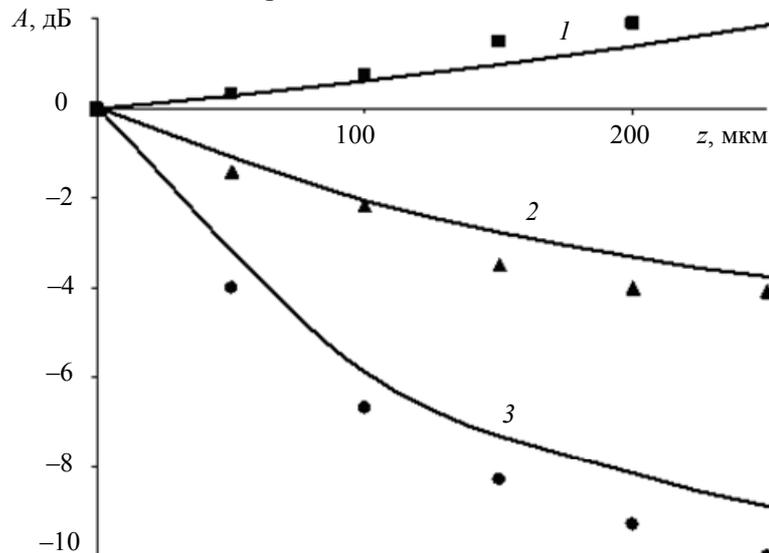


Рис. 3

Заключение. В работе исследованы амплитудные одноволоконные и двухволоконные ВОП отражательного типа для ВОД давления. Компьютерное моделирование ВОП при варьировании геометрических и оптических параметров ВОП, а также экспериментальное исследование оптических потерь ВОП позволило сделать вывод о том, что для ВОД давления наибольшую чувствительность и максимальный динамический диапазон измерений обеспечивают

одноволоконные ВОП, в схеме которых отражающий элемент — тонкая мембрана — изменяет свою кривизну под действием давления. Экспериментальные результаты хорошо коррелируют с результатами компьютерного моделирования, что подтверждает правильность построения численной модели и ее компьютерной реализации.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Санкт-Петербурга ПСП № 090085 2009 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optical Fiber Sensors: System and Applications / Ed. by *B. Calshaw, J. Dakin*. Boston: Artech House, 1989.
2. *Гармаш В. Б., Егоров Ф. А., Коломиец Л. Н., Неугодинов А. П., Поспелов В. И.* Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-Экспресс. 2005. № 6. С. 128—140.
3. *Вознесенская А. О., Мешковский И. К., Миронов С. А., Попков О. С.* Оптимизация схемы амплитудного волоконно-оптического преобразователя отражательного типа // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 6. С. 31—35.
4. *Убайдуллаев Р. Р.* Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендз, 2000.
5. *Бутусов М. М., Галкин С. Л., Орбинский С. П., Пал Б. П.* Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987.
6. *Миронов С. А., Орбинский С. П., Богатырев А. И., Цветков А. В.* Волоконно-оптический датчик давления // Электросвязь. 1992. № 5. С. 32—33.

Сведения об авторе

Анна Олеговна Вознесенская — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: annavmail@mail.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.