

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА АМПЛИТУДНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА

© 2007 г. А. О. Вознесенская; И. К. Мешковский; С. А. Миронов; О. С. Попков

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: annavmail@lycos.com, igorkm@spb.runnet.ru

Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментального исследования функции пропускания амплитудных волоконно-оптических преобразователей (ВОП) отражательного типа. Показано, что наибольшую чувствительность обеспечивают двухволоконные ВОП с различными диаметрами сердцевины оптических волокон и сферическим отражающим элементом.

Коды OCIS: 060.0060.

Поступила в редакцию 14.12.2006.

Введение

Волоконно-оптические преобразователи (ВОП) широко используются во многих отраслях науки и техники в различных сенсорных устройствах для измерения ряда физических и химических воздействий [1]. Интерес к ВОП обусловлен главным образом уникальными свойствами оптических волокон, такими как отсутствие электрической проводимости, механическая гибкость, химическая устойчивость и др. По принципу действия, как известно, ВОП делятся на амплитудные, фазовые, поляризационные [2]. Среди перечисленных ВОП наиболее распространенными и универсальными являются амплитудные, когда внешнее воздействие изменяет интенсивность проходящего излучения.

Основной задачей, возникающей при проектировании ВОП, является достижение наибольшей чувствительности. В настоящей статье представлены расчетные и экспериментальные зависимости функции пропускания от смещения отражающего элемента для амплитудных ВОП различной геометрии и приведены результаты оптимизации схем чувствительных элементов рассмотренных ВОП.

Принцип действия и структура ВОП

Как правило, ВОП состоит из блоков источника и приемника оптического излучения, волоконно-оптической линии и чувствительного элемента, находящегося под воздействием регистрируемого физи-

ческого поля. Схема чувствительного элемента амплитудного ВОП отражательного типа показана на рис. 1. Свет от источника оптического излучения распространяется по входному многомодовому оптическому волокну, отражается от отражающего элемента и возвращается к приемнику оптического излучения по выходному многомодовому оптическому волокну. При внешнем воздействии происходит изменение расстояния z между оптическими волокнами и отражающим элементом, что вызывает изменение функции пропускания, т. е. относительной выходной оптической мощности ВОП $P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$.

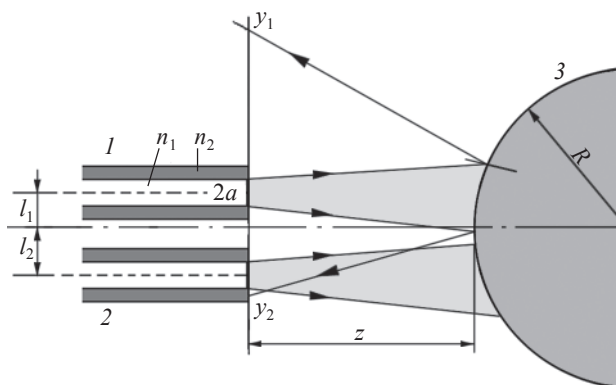


Рис. 1. Схема чувствительного элемента ВОП отражательного типа. 1 – входное оптическое волокно, 2 – выходное оптическое волокно, 3 – отражающий элемент.

Расчет чувствительности ВОП

Традиционно при анализе схем амплитудных ВОП значение относительной выходной мощности $P(z)$ при расстоянии z между оптическими волокнами и отражающим элементом рассчитывают по приближенным формулам для оптических потерь при осевом рассогласовании волокон, например, [3]

$$P = -10 \lg[1/(1 + 2(z/2a) \operatorname{tg}(\arcsin(NA)))]^2 \quad (1)$$

или [4]

$$P = -10 \lg[a/(a + 2z(NA))]^2, \quad (2)$$

где a – радиус сердцевины, NA – числовая апертура оптических волокон.

При этом в [3, 4] предполагается равномерная освещенность отражающего элемента с плоской поверхностью. Применение приближенных формул (1) и (2) ограничивается также малым диапазоном изменения z и возможностью рассчитывать только одноволоконные ВОП. Однако для проектирования ВОП необходимо наличие универсальной модели, позволяющей рассчитывать функции пропускания ВОП различной геометрии, в частности, как одноволоконных так и двухволоконных ВОП с различными параметрами оптических волокон и отражающего элемента.

Как правило, в схемах амплитудных ВОП используются многомодовые оптические волокна, поэтому при численном моделировании ВОП был применен геометрический подход.

Функция пропускания ВОП находилась методом элементарных площадок [5, 6]. Поверхность торца входного оптического волокна разбивалась на ряд элементарных площадок общим количеством $M \times N$, где M и N – количество площадок по направлениям x и y соответственно (рис. 2). При этом предпола-

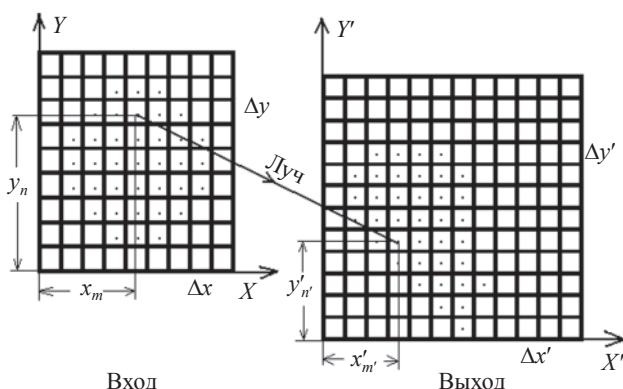


Рис. 2. Расположение площадок на торцах входного и выходного оптических волокон при вычислении функции пропускания оптического преобразователя методом элементарных площадок.

лось, что каждая площадка излучает в пределах кругового конуса, определяемого числовой апертурой волокна. Внутри каждого светового конуса было сформировано W лучей, отличающихся направлением и несущих равную световую энергию j_{0i} , поскольку предполагалось равномерное распределение интенсивности на торце входного оптического волокна.

Далее для каждого i -го входного луча, отраженного от поверхности оптического элемента, определялись координаты x'_i, y'_i точки пересечения с плоскостью торца выходного (приемного) оптического волокна и затем лучи, попавшие в каждую площадку с координатами центра x'_m, y'_n , суммировались.

Функция пропускания ВОП рассчитывалась следующим образом:

$$P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = \left\{ \sum_{i=0}^{W' \times M' \times N'} j_{i(1,2)} \right\} / \left\{ \sum_{i=0}^{W \times M \times N} j_{0i} \right\}.$$

Здесь $j_{i(1,2)}$ – световая энергия, переносимая единичным отраженным лучом при соблюдении двух условий:

1. $x'^2 + y'^2 \leq (2a)^2$ – условие попадания отраженных лучей в область сердцевины приемного волокна.

2. $0 \leq \sin \theta \leq NA$ – условие волноводного распространения света в приемном волокне, где θ – угол падения отраженного луча на торец приемного волокна.

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

С помощью полученной компьютерной модели проведена оптимизация схемы ВОП с целью нахождения схемы, обеспечивающей наибольшую чувствительность ВОП $S = \Delta P/\Delta_z$. В более ранних работах [6–10] были рассмотрены одноволоконная и двухволоконная схемы ВОП с одинаковыми волокнами ($2a_{\text{вх}} = 2a_{\text{вых}} = 50$ мкм). Было показано, что при прочих равных геометрических параметрах ВОП двухволоконная схема обеспечивает большую чувствительность, чем одноволоконная. Однако подобные ВОП со стандартными многомодовыми волокнами ($2a = 50$ мкм, $NA = 0,22$) имеют низкий уровень выходного сигнала ($P_{\text{вых}} > 40$ дБм). С целью нахождения конфигурации ВОП, обеспечивающей одновременно высокую чувствительность и более высокий уровень выходного сигнала, в настоящей работе проанализирована двухволоконная схема ВОП с оптическими волокнами с различными (увеличенными) диаметрами сердцевины и отражаемыми элементами с различной кривизной поверхности.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости изменения относительной выходной оптической мощности ΔP от изменения расстояния Δz ($z_0 = 300$ мкм) при использовании в схеме ВОП отражательного типа оптических волокон с различными диаметрами сердцевин и отражающих элементов с различными радиусами кривизны. Результаты компьютерного моделирования отображают кривые 1–11, расчет по приближенным формулам (1) и (2) – кривые 12 и 13 соответственно. Как видно из рисунка, расчет по приближенным формулам (1) и (2) совпадает с компьютерным моделированием одноволоконной схемы чувствительного элемента ВОП (кривая 11). Наибольшее изменение относительной выходной оптической мощности наблюдается, когда диаметры сердцевин входного и выходного оптических волокон значительно отличаются $2a_{\text{вх}} \neq 2a_{\text{вых}}$ и поверхность отражающего элемента имеет сферическую форму (кривые 9, 10). При этом установлено, что исследуемая характеристика практически не изменяется при инвертировании входного и выходного оптических волокон. Чувствительность рассмотренных двух-

волоконных ВОП с волокнами различного диаметра сердцевин достигает $S \approx 0,1$ дБ/мкм и может быть повышена за счет увеличения разницы между диаметрами сердцевин волокон вплоть до использования одномодового волокна в одном из каналов ($2a_{\text{вх}}$ или $2a_{\text{вых}} = 8$ мкм). Однако в этом случае уровень выходного сигнала низок и схема может быть реализована, только если фотоприемник способен регистрировать достаточно слабые сигналы ($P_{\text{вых}} < -50$ дБм). С целью обеспечения наибольшей чувствительности и практической реализации для дальнейшего изучения была выбрана двухволоконная схема ВОП, имеющего многомодовые оптические волокна с диаметрами сердцевин $2a = 50, 100, 200$ мкм и числовой апертурой $NA = 0,22$.

На рис. 4 представлены результаты расчета зависимости чувствительности S двухволоконных ВОП от кривизны отражающего элемента $1/R$. Видно, что увеличение чувствительности ВОП наблюдается при увеличении кривизны отражающего элемента. В то же время при значительном увеличении кривизны отражающего элемента $1/R$, а также

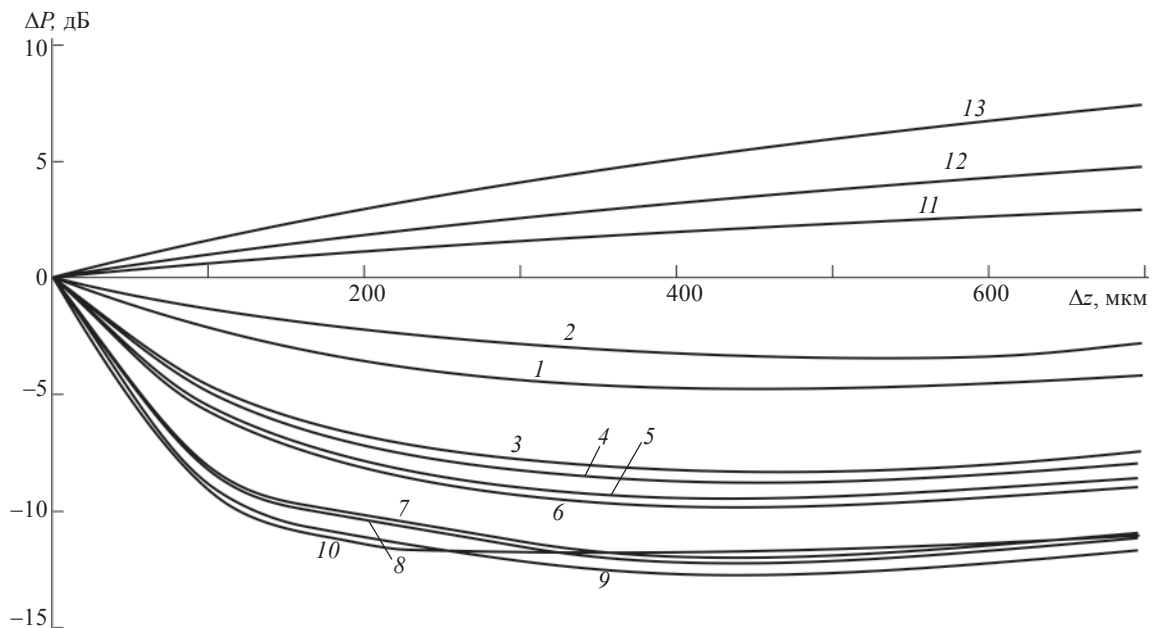


Рис. 3. Расчетные зависимости изменения относительной выходной оптической мощности ΔP от изменения расстояния Δz ($z_0 = 300$ мкм) при использовании в схеме ВОП отражательного типа оптических волокон с различными диаметрами сердцевин и отражающего элемента с различным радиусом кривизны, числовая апертура оптических волокон $NA = 0,22$. Компьютерное моделирование. Двухволоконный ВОП: 1 – $2a_{\text{вх}} = 2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = \infty$; 2 – $2a_{\text{вх}} = 2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = 300$ мкм; 3 – $2a_{\text{вх}} = 100$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = \infty$; 4 – $2a_{\text{вх}} = 200$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 100$ мкм, $R = \infty$; 5 – $2a_{\text{вх}} = 100$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = 300$ мкм; 6 – $2a_{\text{вх}} = 200$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 100$ мкм, $R = 300$ мкм; 7 – $2a_{\text{вх}} = 50$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = \infty$; 8 – $2a_{\text{вх}} = 200$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 50$ мкм, $R = \infty$; 9 – $2a_{\text{вх}} = 50$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = 300$ мкм; 10 – $2a_{\text{вх}} = 200$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 50$ мкм, $R = 300$ мкм. Одноволоконный ВОП: 11 – $2a = 200$ мкм, $R = \infty$. Расчет по приближенным формулам (1) и (2) соответственно: 12 – $2a_{\text{вх}} = 2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = \infty$; 13 – $2a_{\text{вх}} = 2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = \infty$.

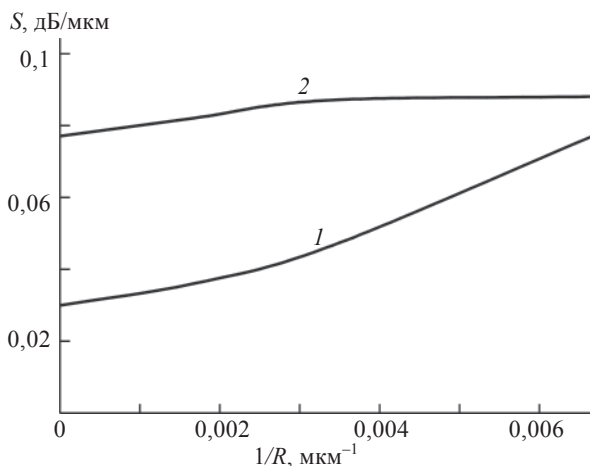


Рис. 4. Расчетные зависимости изменения чувствительности ВОП S от кривизны отражающего элемента $1/R$ ($z_0 = 300$ мкм, $\Delta z = 100$ мкм). 1 – $2a_{\text{вх}} = 200$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 100$ мкм; 2 – $2a_{\text{вх}} = 200$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 50$ мкм.

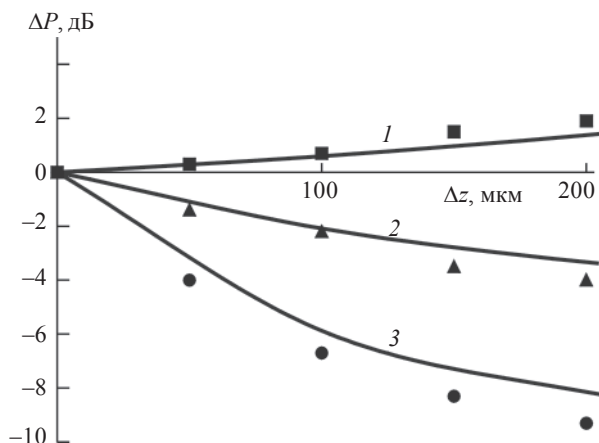


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные (точки) зависимости изменения относительной выходной оптической мощности ΔP от изменения расстояния Δz ($z_0 = 300$ мкм). 1 – одноволоконный ВОП, $2a = 100$ мкм, $R = 300$ мкм; 2 – двухволоконный ВОП, $2a_{\text{вх}} = 2a_{\text{вых}} = 200$ мкм, $R = 300$ мкм; 3 – двухволоконный ВОП, $2a_{\text{вх}} = 200$ мкм, $2a_{\text{вых}} = 100$ мкм, $R = 300$ мкм.

при увеличении расстояния z происходит уменьшение уровня выходного сигнала вследствие непопадания лучей на отражающую поверхность.

Экспериментальные результаты

Экспериментальное исследование зависимости изменения относительной выходной оптической мощности ΔP от изменения расстояния Δz ВОП и проверка результатов компьютерного моделирова-

ния проводились на лабораторном стенде, состоящем из оптического тестера ОТМ-1, содержащего в качестве источника оптического излучения лазерный диод ($\lambda = 850$ нм), а в качестве приемника – кремниевый $p-i-n$ -фотодиод. Исследуемые многомодовые оптические волокна с различными диаметрами сердцевин ($2a = 200$ и 100 мкм) с одной стороны были оконцованы оптическими соединителями для присоединения к блокам ОТМ-1. С другой стороны на свободных концах волокон были сделаны прецизионные сколы ($90^\circ \pm 1^\circ$). Выровненные волокна попарно закреплялись в держателе, установленном на микропозиционере (Standa 7T801). С помощью микропозиционера осуществлялось продольное (вдоль оси z) перемещение оптических волокон относительно отражающего элемента и 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. При исследовании одноволоконного ВОП для разделения входного и выходного сигналов использовался Y -ответвитель.

На рис. 5 представлены результаты экспериментального исследования зависимости изменения относительной выходной оптической мощности ΔP от изменения расстояния Δz образцов одноволоконного и двухволоконных ВОП. Величина перемещения Δz отсчитывается от рабочей точки $z_0 = 300$ мкм, лежащей на линейном участке характеристики, в сторону увеличения расстояния z (для двухволоконных ВОП использовалось левое плечо характеристики – до $z_{\text{max}} \approx 700$ мкм, при котором уровень выходного оптического сигнала $P_{\text{вых}}$ наиболее высокий). Результаты эксперимента показали, что наибольшей чувствительностью обладают двухволоконные ВОП, у которых оптические волокна значительно отличаются диаметрами сердцевин $2a_{\text{вх}} \neq 2a_{\text{вых}}$, а отражающий элемент имеет сферическую поверхность. При этом установлено, что расхождение результатов компьютерного моделирования (сплошные линии) и эксперимента (точки) составило не более 20% для рассмотренных образцов ВОП. Таким образом, показано, что предложенная компьютерная модель расчета функции пропускания ВОП адекватно описывает экспериментальные зависимости.

Заключение

В работе исследованы одноволоконные и двухволоконные ВОП отражательного типа. Использование разработанной авторами компьютерной модели расчета изменения потерь ВОП при варьировании геометрических и оптических параметров ВОП, а

также экспериментальное исследование позволяют сделать вывод о том, что наибольшую чувствительность обеспечивают двухволоконные ВОП, у которых диаметры входного и выходного оптических волокон значительно различаются $2a_{\text{вх}} \neq 2a_{\text{вых}}$ и поверхность отражающего элемента имеет сферическую форму. Рассмотренные ВОП могут быть применены в измерительных устройствах различных физических величин (в частности, в датчиках температуры, перемещения, давления и др.), в том числе работающих в условиях сильных электромагнитных помех, например, в электрических силовых машинах и высокочастотных установках, поскольку являются полностью диэлектрическими.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dakin J., Culshaw B.* Optical Fiber Sensors: Principles and Components, V. 1. Boston, London, Artech House, 1988. 400 p. Перевод: Оптоволоконные сенсоры: принципы и компоненты. Вып. 1 / Под ред. Дейкина Дж. и Кэлшо Б. М.: Мир, 1992. 438 с.
2. *Giallorenze T.G., Bucaro J.A., Dandridge A. et al.* Optical Fiber Sensor Technology // IEEE J. Quant. Electron. 1982. V. QE-18. № 4. P. 626–664.
3. *Убайдуллаев Р.Р.* Волоконно-оптические сети. М.: Экотрендз, 2000. 272 с.
4. *Бутусов М.М., Галкин С.Л., Оробинский С.П., Пал Б.П.* Волоконная оптика и приборостроение / Под общ. ред. Бутусова М.М. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1987. 328 с.
5. *Родионов С.А.* Автоматизация проектирования оптических систем. Учеб. пособие для приборостроительных вузов. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1982. 270 с.
6. *Вознесенская А.О.* Волоконно-оптические амплитудные методы измерения температуры в условиях воздействия сильных электромагнитных полей // Автореф. кандид. дис. СПб: Изд-во СПб ГУИТМО, 2004. 18 с.
7. *Meshkovsky I., Mironov S., Popkov O., Voznesenskaya A.* Fiber Optic Sensor for Non-Destructive Temperature Testing in Systems with Impact of Strong Electromagnetic Fields // Proc. OSAV'2004, Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision, Saint Petersburg, Russia, 18-21 October 2004, State University ITMO. V. 1. P. 310–317.
8. *Вознесенская А.О., Мешковский И.К., Миронов С.А., Попков О.С.* Волоконно-оптический датчик для дистанционного контроля температуры в системах с воздействием сильных электромагнитных полей // Труды XXII Уральской конференции по неразрушающему контролю “Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами”. Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2004. С. 4–5.
9. *Вознесенская А.О., Мешковский И.К., Миронов С.А., Попков О.С.* Волоконно-оптический датчик для измерения температуры в условиях воздействия электромагнитных СВЧ полей // Материалы XVI научно-технической конференции “Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления” / Под ред. Азарова В.Н. М.: МГИЭМ, 2004. С. 169–170.
10. *Вознесенская А.О., Мешковский И.К.* Двухволоконный амплитудный оптический преобразователь отражательного типа // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 3. С. 40–43.