УДК 681.142.4:621.391
ББК 30.10
М91

Рецензенты: кафедра «Радиоприемные устройства»
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт»
(национальный исследовательский университет);

лауреат Государственной премии РФ,
заслуженный машиностроитель РФ, Москва,
д-р техн. наук, проф. **А. В. Гориш**

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований по проекту
№ 18-18-00015, не подлежит продаже

Мурашкина, Т. И.

М91 Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета». Ч. I / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева. СПб.: Политехника, 2018. 187 с.: ил.

DOI: 10.25960/7325-1132-1

ISBN 978-5-7325-1132-1

Приводятся результаты научных разработок, выполненных в НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета в период 1998–2017 гг. в рамках ведущей научной школы России «Волоконно-оптическое приборостроение».

Рассматриваются основы теории проектирования волоконно-оптических средств измерений: измерительных преобразователей, датчиков и измерительных систем на их основе.

Представлены физические и математические основы преобразования измерительной информации в оптической системе волоконно-оптических измерительных преобразователей линейных, угловых микроперемещений и при нарушении условия полного внутреннего отражения с открытым оптическим каналом, принцип действия которых основан на особенностях распределения светового потока в дальней зоне дифракции в виде полого усеченного конуса и определении местоположения поперечных сечений, имеющих равномерное распределение освещенности.

Приведены основные положения теории дифференциального и компенсационного преобразования оптических сигналов в волоконно-оптических датчиках с открытым оптическим каналом, разработанные методики математического моделирования и расчета конструктивно-технологических параметров датчиков с открытым оптическим каналом.

УДК 681.142.4:621.391
ББК 30.10

© Т. И. Мурашкина,
Е. А. Бадеева, 2018

DOI: 10.25960/7325-1132-1
ISBN 978-5-7325-1132-1 © Издательство «Политехника», 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть I

Условные сокращения 6

Введение 8

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ И СИСТЕМАХ 9

1.1. Краткая история развития волоконной оптики 9

1.2. Современное состояние и перспективы внедрения волоконно-оптических датчиков и информационно-измерительных систем на их основе 17

1.3. Основные термины и определения 19

1.4. Некоторые сведения об оптических волокнах 25

1.5. Классификации волоконно-оптических преобразователей и датчиков 37

Глава 2

ФИЗИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ 46

2.1. Ввод оптического излучения в оптический канал 46

2.2. Распределение светового потока в оптической системе волоконно-оптического преобразователя 51

2.3. Распределение мощности светового потока в пространстве волоконно-оптического преобразователя 56

2.4. Математическая модель распределения мощности светового потока в пространстве волоконно-оптического преобразователя от единичного оптического волокна 62

2.5. Модуляция оптического сигнала в пространстве волоконно-оптических преобразователей 69

Глава 3

УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ 73

3.1. Модуляция оптического сигнала зеркально отражающей поверхностью 73

3.1.1. Волоконно-оптический преобразователь микроперемещений 73

3.1.2. Волоконно-оптический преобразователь угловых микроперемещений 78
3.2. Модуляция оптического сигнала в волоконно-оптических преобразователях перемещения аттенюаторного типа 83
3.2.1. Отражательные аттенюаторы 83
3.2.2. Предельные аттенюаторы 87
3.3. Модуляция оптического сигнала в волоконно-оптических преобразователях микроперемещений с модулирующим элементом в виде шарообразной или цилиндрической линзы 92
3.4. Модуляция оптического сигнала в волоконно-оптическом преобразователе с модулирующим элементом в виде границы раздела двух сред с разными коэффициентами преломления . . . 101

Глава 4
ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ 109
4.1. Постановка и решение задачи моделирования оптической системы волоконно-оптических датчиков с открытым оптическим каналом 109
4.2. Алгоритм новой методики проектирования волоконно-оптических датчиков с открытым оптическим каналом 115
4.3. Методика и результаты расчета конструктивных параметров оптической системы волоконно-оптических датчиков отражательного типа 118
4.4. Методика и результаты расчета конструктивных параметров оптической системы волоконно-оптических датчиков аттенюаторного типа 119
4.5. Методика и результаты расчета конструктивных параметров оптической системы волоконно-оптических датчиков с шарообразной или цилиндрической линзой 123
4.6. Математическое и численное моделирование волоконно-оптических преобразователей с модулирующим элементом в виде границы раздела сред с разными коэффициентами преломления 130

Глава 5
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ И КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ И ДАТЧИКАХ 136
5.1. Структурная дифференциальная схема преобразования сигналов 136
5.2. Условия и модулирующие элементы, обеспечивающие дифференциальное преобразование оптических сигналов 141
5.3. Модуляция оптических сигналов с помощью дифференциальных оптических модулирующих элементов 146
5.3.1. Отражающая пластина с двумя отражающими поверхностями 146

5.3.2. Дифференциальный предельный аттенюатор с круглым отверстием 149
5.3.3. Дифференциальный аттенюатор с отражающей поверхностью 154
5.3.4. Шарообразные и цилиндрические линзы, реализующие дифференциальный алгоритм 162
5.4. Результаты машинного эксперимента оптической системы волоконно-оптических преобразователей 170

Список использованной литературы 180

ВВЕДЕНИЕ

Разработка волоконно-оптических средств измерений: измерительных приборов, датчиков, информационно-измерительных систем — исключительно наукоемкая область, синтезирующая достижения механики, физики, химии, физики жидкостей и газа, физики твердых тел, теплофизики, прикладной математики, теории упругости, электроники, теории измерений, метрологии и др.

Авторы приводят результаты научных разработок, выполненных под их руководством в НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета в период 1998–2017 гг. в рамках ведущей научной школы России «Волоконно-оптическое приборостроение».

Рассматриваются физические и математические основы преобразования измерительной информации в оптической системе волоконно-оптических измерительных преобразователей линейных и угловых микроперемещений с открытым оптическим каналом, принцип действия которых основан на особенностях распределения светового потока в дальней зоне дифракции в виде полого усеченного конуса и на определении местоположения поперечных сечений, имеющих равномерное распределение освещенности.

Приведены основные положения теории дифференциального и компенсационного преобразования оптических сигналов в волоконно-оптических датчиках (ВОД) с открытым оптическим каналом, основанной на формировании в зоне измерения двух и более независимых световых потоков от одного источника излучения путем применения дифференциальных оптико-модулирующих элементов и новых схем взаимного расположения оптических волокон в рабочих торцах волоконно-оптических кабелей.

Представлены разработанные методики математического моделирования и расчета конструктивно-технологических параметров ВОД с открытым оптическим каналом, учитывающие особенности и связь последовательности математических преобразований с конструктивно-технологической оптимизацией параметров оптической системы.

Даны новые технические решения дифференциальных ВОД с открытым оптическим каналом и волоконно-оптических информационно-измерительных систем на их основе с техническими характеристиками, отвечающими современным требованиям со стороны в первую очередь изделий ракетно-космической и авиационной техники, АЭС, нефтегазовой отрасли, медицины.

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ И СИСТЕМАХ

1.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

Использование электромагнитных волн светового диапазона для связи и передачи информации является естественным способом общения человека с окружающей средой. Свыше 90 % информации об окружающем его мире человек получает с помощью органов зрения. Поэтому, когда у людей появилась необходимость передавать сигналы на большие расстояния, одним из оперативных видов связи стала оптическая. Использование света для передачи информации имеет давнюю историю, еще моряки в XVII веке применяли сигнальные лампы для передачи информации с помощью кода Морзе, а маяки в течение многих веков предупреждали мореплавателей об опасностях.

Изобретение Клодом Шаппом оптического телеграфа в 1791 г. во Франции можно считать первой вехой на пути развития оптической связи. Сигнальщики располагались на вышках, расположенных от Парижа до Лилля по цепочке длиной 230 км. Сообщения передавались из одного конца в другой за 15 минут. В Соединенных Штатах Америки оптический телеграф соединял Бостон с островом Мартас Винъярд, расположенным недалеко от этого города. Все эти системы со временем были заменены электрическими телеграфами.

Впервые возможность использовать световоды — устройства для передачи света на расстояние по прямому и изогнутому каналу — выявлена русским инженером В. Н. Чиколевым в 60-х годах XIX столетия. Он использовал передачу света по световодам для освещения пороховых погребов Охтинского порохового завода угольными дугами, расположенными вне взрывоопасного помещения. Его световоды представляли собой полые металлические трубы с внутренней зеркальной поверхностью.