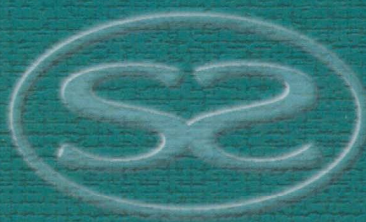


ISSN 1992-7185

ИКА
журнал в журнале

Датчики и Системы

5 • 2013



SENSORS & SYSTEMS

УЧРЕДИТЕЛИ

Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН,
Московский государственный институт
электроники и математики, "МВТК"
(Ассоциация делового и научно-техничес-
кого сотрудничества в области машиностро-
ения, высоких технологий и конверсии.
Национальная технологическая палата),
ООО "СенСидат-Контрол" (редакция)

Гл. редактор **Ф.Ф. Пашенко**
Зам. гл. редактора **Н.Н. Кузнецова**
Зам. гл. редактора **А.Ф. Каперко**
Гл. редактор ИКА **В.Ю. Кнеллер**
Научный редактор **Г.М. Баранова**
Выпускающий редактор **С. В. Суханова**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Р.Р. Бабаян, Г.М. Баранова, Г.И. Джанджгава,
В.Г. Домрачев, А.Н. Житков, Э.Л. Ицкович,
А.Ф. Каперко, В.Ю. Кнеллер, Л.Н. Коломиец,
Н.Н. Кузнецова, В.П. Морозов, Ф.Ф. Пашен-
ко, Г.А. Пикина, Б.И. Подлепещкий, В.В. Поля-
ков, Н.Л. Прохоров, И.Б. Ядыкин

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РЕДСОВЕТЫ

(руководители)

Санкт-Петербург
В.Г. Кнорринг —
(812) 297-60-01

Нижний Новгород
С.М. Никулин —
(831) 436-78-40

Екатеринбург
С.В. Поршнева —
(343) 375-97-79

Челябинск
Л.И. Боришпольский —
(351-2) 41-45-26

Новосибирск
Ю.В. Чугуй —
(383-3) 33-73-60

Красноярск
В.Г. Патоков —
(391-2) 912-279

Бийск
Ю.А. Галенко —
(3854) 43-25-69

Л.С. Звольский
(3854) 30-59-44

Пенза
Е.А. Мокров —
(841-2) 56-55-63

М.А. Шербаков —
(841-2) 56-37-08

Рязань
С.Н. Кириллов —
(491-2) 92-04-55

Ульяновск
Н.Г. Ярушкина —
(842-2) 43-03-22

Уфа
В.Г. Гусев —
(347-2) 23-77-89

Ижевск
В.А. Алексеев —
(341-2) 21-29-33

Оренбург
М.Г. Кучеренко —
(353-2) 77-34-19

Орел
В.И. Гавришук —
(486-2) 41-00-35

Владимир
В.Н. Устюжанинов —
(492-2) 33-59-67

Тула
В.Я. Распопов —
(487-2) 35-19-59

Воронеж
В.К. Битюков —
(473-2) 55-36-94

Курск
В.С. Титов —
(471-2) 58-71-12

Липецк
А.К. Погодаев —
(4742) 32-80-00

Л.А. Кузнецов —
(4742) 32-80-44

Тамбов
С.В. Мищенко —
(475-2) 72-10-19

Астрахань
И.Ю. Петрова —
(851-2) 25-73-11

Минск
И.С. Манак —
(417) 278-13-13

Львов
И.И. Марьямова —
(10-380-322)
72-16-32

Журнал включен в Перечень ведущих
рецензируемых изданий ВАК, публикующих
основные результаты докторских и кандидатских
диссертаций (октябрь 2010 г.)

Подписные индексы:
79363 в каталоге Роспечати; 40874 в каталоге
"Пресса России"

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
117997, ГСП-7, Москва, ул. Профсоюзная, 65, к. 383
Тел./факс: (495) 330-42-66
www.datsys.ru
E-mail: datchik@ipu.rssi.ru

Оригинал-макет и электронная версия
подготовлены ИП Прохоров О. В..
Отпечатано в типографии "ЭЛИТ-ЮТЕРНА"
Заказ 62/05
Подписано в печать 4.05.2013.
Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-24419 от 18 мая 2006 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Вишнеков А. В., Сафонова И. Е. Функциональные датчики в структуре специали-
зированной телекоммуникационной сети. 2

Ионов Б. П., Ионов А. Б., Мирная А. И. Разработка лабораторного образца
спектрального пирометра на основе интерферометра Майкельсона 7

Кострин Д. К., Ухов А. А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические
параметры спектрометров с ПЗС фотоприемниками 13

Холомина Т. А., Кострюков С. А., Литвинов В. Г., Ермачихин А. В. Спектроскопия
низкочастотных шумов полупроводниковых приборов. 15

Еськов А. В., Маецкий А. В., Сагалаков А. М. Оптический метод исследования
процесса распыления рапсового и дизельного топлива. 21

Карцев Е. А., Климантович А. А., Юрин А. И. Методика выбора оптимального
средства измерений из числа альтернативных 24

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ДАТЧИКОВ, ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Дмитриенко А. Г., Блянов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Опережающее
проектирование при разработке датчиков для перспективных изделий ракетно-
космической техники. 30

Дмитриев А. В., Красивская М. И., Юрин А. И. Исследование волоконно-опти-
ческих датчиков с внешней модуляцией. 34

Лашков А. В., Анашкин Ан. Ал., Анашкин Ал. Ан. и др. Оценка возможности при-
менения термодаталитических сенсоров для формирования газоаналитических
мультисенсорных систем 38

Касаткин С. И., Муравьев А. М., Плотникова Н. В. и др. АМР головка-градио-
метр для контроля изделий по создаваемому ими магнитному полю 43

Ясовеев В. Х., Коровин В. М., Атауллин Ф. Р., Шарипов М. М. Система дистан-
ционного тестирования приборов акустического каротажа. 46

ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИЗАЦИЯ (журнал в журнале)

Автоматизация технологических процессов — взгляд в будущее. Реферат 51

Новости 54

ХРОНИКА

**Международный МЭМС-Форум 2013. "МЭМС-датчики и малогабаритные системы.
Сферы применения"** 57

* * *

Contents and abstracts 60

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ВНЕШНЕЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

А. В. Дмитриев, М. И. Красивская, А. И. Юрин

Рассмотрено математическое моделирование волоконно-оптических датчиков с внешней модуляцией. На основе разработанной математической модели исследовано влияние параметров волоконно-оптических каналов на функцию преобразования.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, функция преобразования, световод, математическая модель.

Волоконно-оптические датчики (ВОД) являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений оптоэлектроники. За последние десятилетия произошел стремительный прорыв от простейших конструкций ВОД к созданию широкой номенклатуры датчиков физических величин, используемых в всевозможных областях науки и техники, таких, как химическая и нефтеперерабатывающая промышленность, авиа- и космическая техника, транспорт, строительство, биомедицинская промышленность и др. [1]. Созданные к настоящему времени датчики на основе элементов волоконной оптики по своим характеристикам не уступают, а в большинстве случаев превосходят, датчики других типов. К основным преимуществам таких датчиков можно отнести общую технологическую базу для преобразователей различных физических величин, взрыво- и пожаробезопасность, устойчивость при работе в агрессивных средах, при высоких температурах и воздействии электромагнитных полей, возможность проведения измерений в труднодоступных зонах и др. [4].

Принцип действия ВОД основан на модуляции физическим воздействием параметров оптического излучения, которое распространяется от

источника излучения к фотоприемнику по каналу, содержащему элементы волоконной оптики. В зависимости от места воздействия на оптическое излучения измеряемой величины ВОД можно разделить на две большие группы [1]: ВОД с внутренней модуляцией и ВОД с внешней модуляцией. В первой группе оптическое волокно выступает в качестве чувствительного элемента. При этом модуляция параметров оптического излучения может быть осуществлена как механическим воздействием на волокно, так и температурой, магнитными и электрическими полями.

Однако наиболее широкое применение нашли ВОД с внешней модуляцией. Это обусловлено в первую очередь возможностью реализации на их основе бесконтактных методов измерения ряда физических величин. Наряду с этим они конструктивно просты, характеризуются малыми габаритами и низкой стоимостью. Первые разработки ВОД с внешней модуляцией представляли собой эффективную альтернативу классическим фотоэлектрическим преобразователям. Замена зеркально-линзовых каналов на волоконно-оптические позволила получить ряд существенных преимуществ: широкий температурный диапазон, высокую помехозащищенность, универсальность применения

и др. В дальнейшем были разработаны принципиально новые датчики, наиболее полно использующие уникальные свойства элементов волоконной оптики. К таким датчикам можно отнести волоконно-оптические акселерометры, измерители шероховатости поверхности, датчики для биомедицинских применений и др.

Принцип действия ВОД данного типа основан на модуляции интенсивности светового потока при его распространении в пространстве между передающим и приемным волоконно-оптическими каналами. Эта модуляция может быть осуществлена изменением параметров среды модулирующего пространства (показатель преломления, рассеяния, поглощения); вариацией пространственного положения торцов передающего или приемного волокна; изменением положения, геометрических (шероховатость, форма, размеры) и физических (коэффициенты отражения, пропускания) свойств объекта измерения.

Можно выделить два типа ВОД с внешней модуляцией — датчики прямого типа (ВОД-П) и датчики рефлектометрического типа (ВОД-Р). В первом случае осуществляется модуляция потока, направляемого из передающего в приемный канал, во втором — регистрация отраженного от поверхности изучаемого объекта оптического излучения.

В качестве волоконно-оптических каналов ВОД могут быть использованы единичные волоконные световоды (ВС) либо волоконно-оптические жгуты (ВОЖ) на их основе. Большое разнообразие конструкций ВОЖ позволяет создавать датчики различного назначения, обладающие большими функциональными возможностями, большой надежностью и высокими метрологическими характеристиками.

Вид функции преобразования ВОД определяется многими факторами, при этом одним из основных является конструкция приемо-передающего канала. Для выбора оптимальной конструкции ВОЖ датчиков различного назначения необходимы детальные исследования по определению влияния параметров ВС, формы и размеров торцов ВОЖ, свойств объектов измерения на характеристики функции преобразования датчиков. Такие исследования были проведены на основе разработанной математической модели ВОД с внешней модуляцией, учитывающей основные параметры конструктивных узлов датчика (источника излучения, фотоприемника, волоконного приемо-передающего канала) и свойства объекта измерения [3].

Рассмотрим принцип построения математической модели ВОД-П на основе регулярных ВОЖ

с произвольной формой торцов. Поскольку в таких преобразователях расстояние между излучающим и приемным торцами значительно превосходит линейные размеры торцов ВС, то их, с достаточной для практического применения точностью, можно представить точечными источниками. При этом выходной торец передающего жгута будет представляться полем дискретных источников излучения, а вся поверхность приемного ВОЖ — приемником с учетом коэффициентов заполнения торца η_c и дефектности волокон η_p .

Пусть плоскость выходного торца передающего ВОЖ лежит в координатной плоскости XOY , а вся поверхность торца задана областью $T(x, y)$. Выделим в передающем жгуте единичное волокно с координатами центра выходного торца (x_j, y_j) . Этот точечный источник имеет силу света [2]:

$$J_T(\alpha) = \pi B_{\text{вх}}(\alpha) f(\alpha) r_c^2 \cos \alpha, \quad (1)$$

где $B_{\text{вх}}(\alpha)$ — яркость излучения на входном торце передающего ВС в направлении α , r_c — радиус сердцевины волокна, $f(\alpha) = (1 - \rho_{\text{ф}})^2 e^{-\varepsilon P} \rho^{\eta_3}$ — диаграмма направленности излучения на выходе ВС. Здесь $\rho_{\text{ф}}$ — коэффициент френелевского отражения на торцах ВС, ε — натуральный показатель поглощения света материалом сердцевины волокна, $P = l_c / \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n_c^2}}$ — длина пути светового луча в волокне (l_c — длина волокна), ρ — коэффициент отражения луча в волокне на границе сердцевины-оболочка, $\eta_3 = 1,18 \frac{d_c \sin \alpha}{l_c \sqrt{n_c^2 - \sin^2 \alpha}}$ — эффективное число отражений лучей в ВС.

Элементарный поток излучения, выходящий из передающего волокна и распространяющийся в телесном угле $d\Omega = \sin \alpha d\alpha d\varphi$ равен [2]:

$$dF = J_T(\alpha) \sin \alpha d\alpha d\varphi, \quad (2)$$

где φ — угол между проекцией луча на плоскость XOY и осью OX .

Интегрируя (2) в пределах телесного угла, определяемого эффективным апертурным углом $u_{\text{эфф}}$ передающего ВС, получим полный световой поток, выходящий из волокна:

$$F_T = \frac{\pi}{2} r_c^2 \int_0^{u_{\text{эфф}}} \int_0^{2\pi} B_{\text{вх}}(\alpha) f(\alpha) \sin 2\alpha d\alpha d\varphi, \quad (3)$$

где $u_{\text{эфф}} = \arcsin(A_{\text{эфф}})$,

$$A_{\text{эфф}} = n_1^2 - 2\pi\sqrt{(n_c^2 - n_o^2)(n_1^2 - n_c^2 + n_o^2)} + [n_1^2 - 2(n_c^2 - n_o^2)]\arccos\frac{\sqrt{n_c^2 - n_o^2}}{\alpha},$$

где n_1, n_c, n_o — показатели преломления среды, сердцевины и оболочки волокна.

Часть этого потока (F_R) падает на поверхность торца приемного ВОЖ. Для нахождения этого потока необходимо определить координаты x_2, y_2 проекции на плоскость XOY точки падения луча на плоскость входного торца приемного ВОЖ. Очевидно, что данная задача сводится к решению системы уравнений, составленной из уравнений луча и уравнения поверхности торца.

Пусть плоскость поверхности торца приемного ВОЖ задана произвольной точкой $O_R(x_0, y_0, z_0)$ и направляющими косинусами нормали $N_R(\cos y_x, \cos y_y, \cos y_z)$. Направляющие косинусы луча, определяемого направлением (α, φ) , соответственно равны $\cos u_x = \sin\alpha\cos\varphi$, $\cos u_y = \sin\alpha\sin\varphi$, $\cos u_z = \cos\alpha$. Тогда исходная система уравнений запишется следующим образом:

$$\begin{cases} (x - x_0)\cos y_x + (y - y_0)\cos y_y + (z - z_0)\cos y_z = 0, \\ \frac{x - x_i}{\sin\alpha\cos\varphi} = \frac{z}{\cos\alpha}, \\ \frac{y - y_i}{\sin\alpha\sin\varphi} = \frac{z}{\cos\alpha}. \end{cases} \quad (4)$$

Решая систему уравнений (4), получим требуемые координаты (x_2, y_2) проекции точки падения луча на плоскость поверхности торца приемного ВОЖ. Если полученная точка принадлежит области $R(x, y)$ (проекция поверхности входного торца приемного ВОЖ), то элементарный поток, переносимый лучом (α, φ) , входит в поток F_R . Таким образом, для определения полного потока F_R необходимо проинтегрировать (3) по области значений (α, φ) , для которых отображение $(\alpha, \varphi) \rightarrow (x_2, y_2) \in R(x, y)$.

Тогда величина потока излучения, поступающего к фотоприемнику от ij волокна передающего ВОЖ с учетом светопропускания приемного жгута $T(\beta)$, определяется следующим выражением:

$$F_{\text{фп}}^{ij} = \frac{\pi}{2} r_c^2 \eta_c \eta_p \iint_{R(x, y)} B_{\text{вх}}(\alpha) f(\alpha) T(\beta) \sin 2\alpha d\alpha d\varphi, \quad (5)$$

где β — угол падения луча на поверхность торца приемного жгута, определяемый из выражения:

$$\cos\beta = \cos y_x \sin\alpha \cos\varphi + \cos y_y \sin\alpha \sin\varphi + \cos y_z \cos\alpha.$$

Область интегрирования $R(x, y)$ в явном виде для общего случая определить не представляется возможным, однако это удается сделать для конфигураций приемо-передающих торцов, обладающих определенной группой симметрии.

Для определения полного потока излучения, воздействующего на фотоприемник, необходимо просуммировать элементарные потоки (5):

$$F_{\text{фп}} = \sum_i \sum_j F_{\text{фп}}^{ij}. \quad (6)$$

Полученные расчетные соотношения могут быть использованы для моделирования как ВОД прямого типа, так и ВОД угловых и линейных перемещений плоской поверхности рефлектометрического типа. В последнем случае требуется эквивалентное преобразование ВОД-П в преобразователь прямого типа, заключающееся в зеркальном отображении плоскости торца приемного жгута относительно отражающей плоскости.

Проведены экспериментальные исследования ВОД на основе жгутов с гексагональной укладкой волокон и плотностью упаковки $\eta_0 = 0,75$, диаметр сердцевины и оболочки волокон соответственно $d_c = 22$ мкм, $d_o = 25$ мкм, показатели преломления материалов сердцевины и оболочки волокна $n_c = 1,62$, $n_o = 1,52$, натуральный показатель поглощения излучения материалом сердцевины $\varepsilon = 0,1 \text{ м}^{-1}$, номинальная апертура волокна $A_0 = 0,56$.

На рис. 1 приведены экспериментальная и теоретическая функции преобразования датчика перемещений рефлектометрического типа на основе коаксиального жгута длиной $l_c = 165$ мм, радиусом центрального передающего ВОЖ $R_1 = 1,5$ мм и

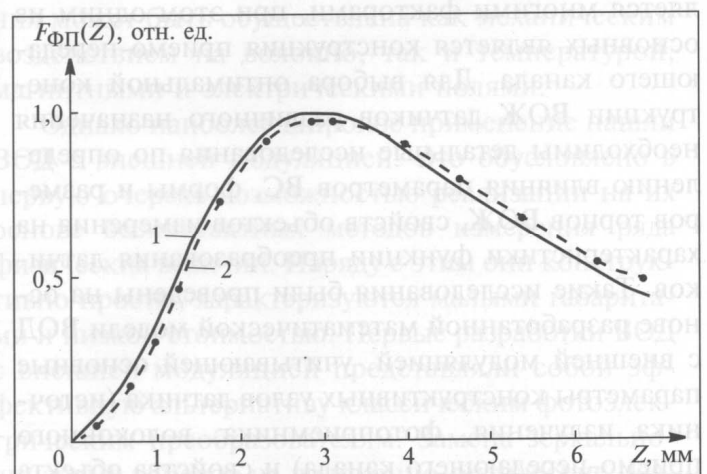


Рис. 1. Сравнение теоретической (1) и экспериментальной (2) функций преобразования датчика перемещений рефлектометрического типа

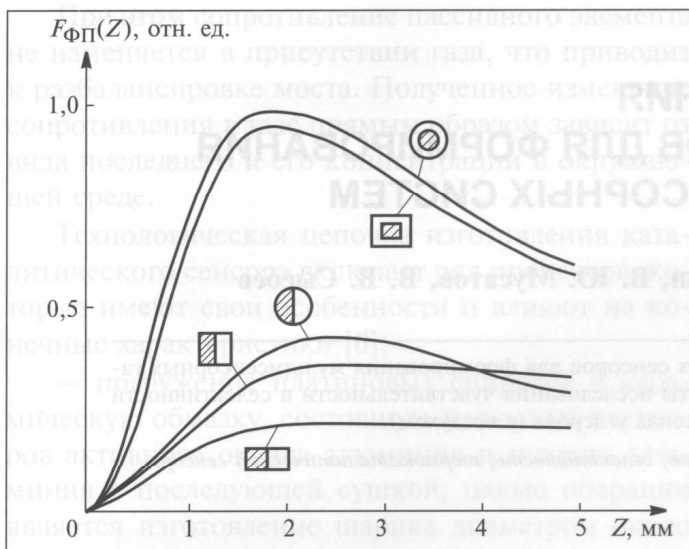


Рис. 2. Теоретические функции преобразования датчиков перемещений рефлектометрического типа, имеющих жгуты с различной формой приемо-передающего торца:

▨ — передающий ВОЖ; □ — приемный ВОЖ; $S_T = S_R = 3 \text{ мм}^2$

внешним радиусом приемного ВОЖ $R_2 = 3 \text{ мм}$. Максимальный интервал неопределенности экспериментальной характеристики при уровне доверия $P_d = 0,95$ составил $6,5 \cdot 10^{-3}$.

Из рис. 1 видно, что теоретическая и экспериментальная характеристики совпадают с погрешностью не более 10 %.

Разработанные математические модели ВОД позволяют провести комплексные исследования датчиков различного назначения, оптимизировать конструкцию волоконно-оптических каналов. Для примера на рис. 2 представлены теоретические функции преобразования ВОД-Р, имеющие жгуты с различной формой приемо-передающего торца. При этом площади приемного S_T и передающего S_R торцов во всех случаях постоянны и равны 3 мм^2 .

Анализ полученных зависимостей показывает, что наиболее оптимальной конструкцией ВОЖ, при которой достигается максимальный коэффициент преобразования, является коаксиальный ВОЖ круглой формы. Для датчиков на основе разветвленных жгутов, имеющих торцы, разделенные пополам, функция преобразования имеет достаточно протяженный участок, на котором выходной сигнал практически не зависит от расстояния до отражающей поверхности. Это позволяет сделать вывод о целесообразности применения подобных конструкций ВОЖ в датчиках, построенных по принципу экранирования светового потока, а также в качестве избыточных каналов информации для компенсации изменения отражающих свойств поверхности объекта измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Удда Э. — М.: Техносфера, 2008. — 520 с.
2. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика. Теория и практика. — М.: КУДИЦ-Пресс, 2008. — 320 с.
3. Дмитриев А. В. Волоконно-оптические датчики для биомедицинских применений // Тр. Междунар. НТК "Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий". — Сочи, 2001.
4. Карцев Е. А., Красивская М. И. Сопоставительная оценка датчиковой аппаратуры отечественного и зарубежного производства // 16 НТК "Датчик-2004", Судак, 2004.

Работа выполнена на кафедре "Микросистемная техника, материаловедение и технология" МИЭМ, Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики".

Дмитриев Алексей Викторович — канд. техн. наук, доцент кафедры;

Мария Игоревна Красивская — старший преподаватель;

Александр Игоревич Юрин — канд. техн. наук, доцент.

☎ (499) 235-97-27

E-mail: Alexander.yurin@gmail.com

**ДАТЧИКИ
СИСТЕМЫ**

Уважаемые читатели!

Если Вы не успели подписаться на журнал "Датчики и системы", напоминаем Вам, что через Редакцию можно оформить льготную подписку в любое время и с любого номера (дешевле, чем через каталоги агентств) или приобрести номера журнала за прошедшие годы.

Можно также заказать электронные версии как необходимого Вам номера журнала, так и отдельных статей.

Позвоните в Редакцию по тел. (495) 330-42-66 или пришлите заказ по электронной почте (E-mail: datchik@ipu.rssi.ru) — и подписка будет оформлена за один день. Расходы по пересылке журнала Редакция берет на себя. Не забудьте указать свой полный почтовый адрес!

Наш адрес: 117997, В-342, ГСП-7, Профсоюзная ул., д. 65, ИПУ РАН, оф. 383.