

В.А. Григорьев, д-р техн. наук, начальник отдела ЗАО «МНИТИ»;
Ю.Т. Ларин, д-р техн. наук, директор научного направления – заведующий отделением ОАО «ВНИИКП»;
А.Г. Летяго, д-р техн. наук, советник генерального директора ЗАО «МНИТИ», член-корреспондент РАН, лауреат Государственной премии РФ;
А.Н. Мартынов, д-р техн. наук, профессор кафедры ВА РВСН им. Петра Великого;
В.И. Прядко, д-р техн. наук, первый заместитель генерального директора ЗАО «Эврика», лауреат Государственной премии РФ;
А.А. Рахманов, д-р техн. наук, профессор, заместитель главного конструктора ООО «РТИ»



Аннотация. Показана эффективность применения теории оптических линий передачи и использования высокоопертурных оптических волокон для построения датчиков с повышенными метрологическими характеристиками.

Ключевые слова: линия передачи информации, теория оптических волноводов, функция преобразования датчика, оптические волокна типа «кварц-полимер», оптический датчик.

Abstract. The efficiency of application of the data transmission line theory and high numerical aperture optical fibers for designing optical sensors with high metrological characteristics was investigated.

Key words: data transmission line, optical waveguide theory, response function, «quartz-polymer» optical fiber, optical sensor.

Материал поступил в редакцию 10.04.2014
 Григорьев В.А. E-mail: mniti@mniti.ru

Некоторые вопросы использования теории оптических линий передачи для измерения физических величин

Часть 2

В статье «Некоторые вопросы теории использования оптических линий передач для измерения физических величин», часть 1 [1] были рассмотрены вопросы расчета оптических датчиков мембранного типа на основе теории оптических волноводов, которые применяются в линиях передачи информации. В результате этой работы было получено выражение (1), которое позволяет на основе математических зависимостей для оптического соединения волоконных световодов оперативно проводить расчеты амплитудных волоконно-оптических преобразователей отражательного типа.

$$P_n = P_u L \left[1 - \frac{2}{\pi} \left[\arcsin \left(\frac{x}{2a + z \cdot \operatorname{tg} q} \right) + \frac{x}{2a + z \cdot \operatorname{tg} q} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{2a + z \cdot \operatorname{tg} q} \right)^2} \right] \right] \times \left[1 - \left(\frac{z}{4a + 2z \cdot \operatorname{tg} q} \right) NA \right]^2 \left[\frac{a}{a + \frac{1}{2} z \cdot \operatorname{tg} q} \right]^2 \left[1 - 2 \left[\frac{n_1 - n}{n_3 + n} \right]^2 \right], \quad (1)$$

где P_u – величина оптической мощности на торце излучающего световода; P_n – величина оптической мощности на торце передающего световода; a – радиус сердцевинки передающего световода; r – радиус сердцевинки излучающего световода; z – продольное смещение световодов; x – поперечное смещение осей волоконных световодов; n – показатель преломления окружающей среды; n_1 – показатель преломления сердцевинки излучающего световода; NA – числовая апертура световодов; $2r = 2a + z \operatorname{tg} q$,

$\operatorname{sin} q = NA$; q – апертурный угол световода; L – коэффициент отражения мембраны.

Его правомерность была апробирована на теоретической модели с использованием оптических волокон типа «кварц-кварц» с диаметром сердцевинки 50 мкм и числовой апертурой 0,18. Однако применение оптических волокон этого типа имеет определенные ограничения, связанные с большими оптическими потерями в зоне измерения.

Представляется возможность расширить и улучшить параметры этих датчиков, применяя в их конструкции оптические волокна с большим диаметром сердцевинки и большой апертурой (более 200 мкм и 0,27). Это оптические волокна типа «кварц-полимер», многокомпонентные и полимерные, с диаметрами сердцевинки до 1–1,2 мм и числовой апертурой до 0,58 [2–4].

Применение высокоапертурных волокон рассмотрим на примере оптического волокна типа «кварц-полимер» (рис. 1). Волокна обладают большим размером сердцевинки (от 200 мкм в диаметре и числовой апертурой от 0,28).

Излучение от источника распространяется по приемному световоду 1 и попадает на мембрану 4. На мембране формируется область отражения. Эта область является источником отраженного излучения, которая рассматривается как торец дополнительного излучающего световода 3. Излучение от мембраны распространяется по передающему световоду 2 на фотоприемник. Изменение расстояния z между мембраной и торцами световодов

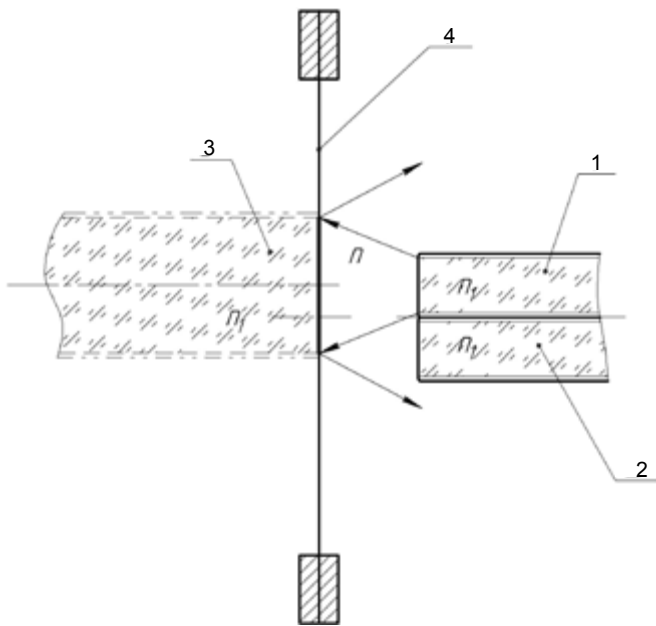


Рис.1. Схема взаимодействия мембраны и приемо-передающего канала на основе двух волоконных световодов «кварц-полимер»:

1 – приемный световод, принимающий излучение от полупроводникового лазера; 2 – световод, передающий излучение на фотоприемник; 3 – излучающий световод (сформированное на мембране отражение приемного световода), направляющий излучение от приемного в передающий световоды посредством мембраны; 4 – мембрана; n – показатель преломления окружающей среды; n_1 – показатель преломления сердцевин световодов (показатель преломления светоотражающей оболочки световодов на рисунке не показан)

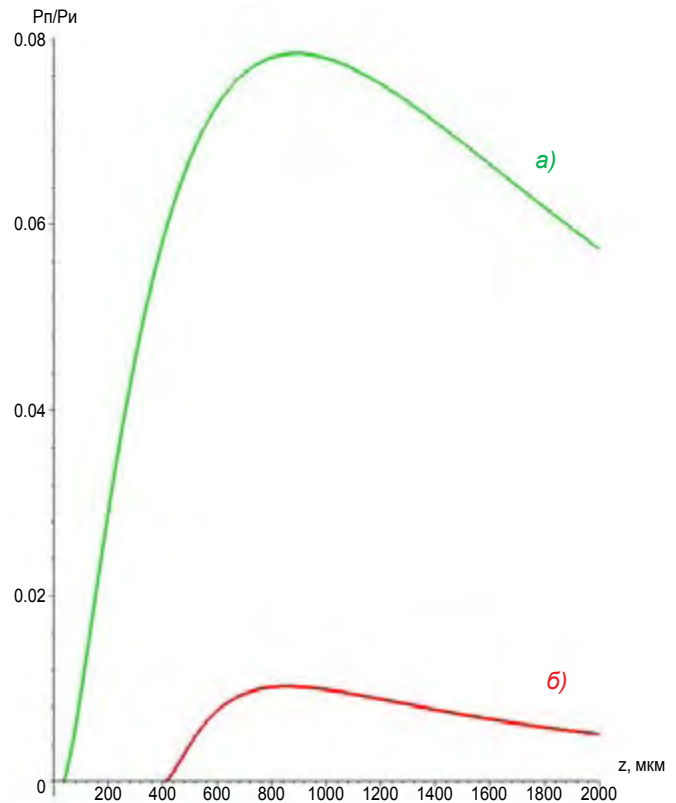


Рис. 2. Функции преобразования амплитудных волоконно-оптических преобразователей отражательного типа: а) на основе оптических волокон «кварц-полимер» (зеленая линия); б) на основе оптических волокон «кварц-кварц» (красная линия)

под действием давления вызывает изменение величины излучения на фотоприемнике. Физически дополнительный излучающий световод 3 не существует. Как физическая реальность существует только его излучающий торец, соответствующий созданной на поверхности мембраны области отражения с переменным радиусом. Существование этого излучающего торца позволяет заменить взаимодействие мембраны и световодов только на взаимодействие световодов и применить к ним теорию оптических волноводов, которая становится теоретическим аппаратом для расчета параметров оптических датчиков.

На основе зависимости (1) построена функция преобразования для приемо-передающего канала с двумя волоконными световодами «кварц-полимер» (рис. 2, зеленая линия). Построение выполнено для световодов с параметрами: радиус сердцевин $a = 200$ мкм, числовая апертура $NA = 0,28$, поперечное смещение $x = 410$ мкм. Здесь же приведена функция преобразования приемо-передающего канала с двумя волоконными световодами «кварц-кварц» (рис. 2, красная линия).

Сопоставительный анализ показывает, что приемо-передающий канал датчика на основе оптических волокон «кварц-кварц» имеет в зоне измерений оптические потери, в 16 раз (на 12 дБ) превышающие потери для приемо-передающего канала на основе оптических волокон «кварц-полимер». Поэтому использование в датчиках оптических волокон «кварц-кварц» обязательно предполагает разработку высокочувствительной, а потому сложной и дорогостоящей электрической схемы оптоэлектронного блока формирования и обработки измерительной информации. Применение же оптических волокон «кварц-полимер» существенно улучшает

параметры оптических датчиков за счет снижения потерь в зоне измерения.

Использование в датчиках давления мембранного типа оптических волокон «кварц-полимер» дает возможность близкого расположения волокон в общем торце преобразователя. Это вызывает интересный эффект, который наблюдается, когда торец приемо-передающего канала непосредственно касается поверхности мембраны. Теоретически в этом случае поток излучения не выходит за пределы световода 1 и не попадает в световод 2. Значение функции преобразования равно нулю. Однако, на практике картина несколько иная. Эксперименты показывают, что существует некоторое, весьма незначительное, излучение, которое и при контакте торцов световодов с поверхностью мембраны проникает в передающий световод. Поэтому линия функции преобразования на рис. 2 имеет начало в некотором значении оси ординат, отличном от нуля (на рисунке не показано). Это явление выходит за рамки геометрической оптики, на основе которой построена зависимость (1), и находит объяснение в волновой оптике на уровне интерферометрических эффектов [5].

Но не только отсутствие расстояния между мембраной и общим торцом приемо-передающего канала вызывает рассмотренный эффект. Наличие и увеличение расстояния между мембраной и торцами приемного и передающего световодов также приводит к появлению еще более интересных явлений, связанных с возникновением освещенной области на поверхности мембраны. Отраженное от мембраны излучение формирует на плоскости торца передающего световода засвеченную круговую область с радиусом R . С увеличением расстояния между мембраной

и общим торцом световодов круговая область постепенно засвечивает всю площадь приемного торца передающего световода. Происходящее при этом изменение величины мощности излучения на приемном торце передающего световода описывает функция преобразования. Явно выделяются два интервала и три особые точки этой функции: восходящий и нисходящий участки, максимум функции, и точки перегиба на восходящем и нисходящем участках функции преобразования.

Достоинство полученной математической зависимости (1) функции преобразования амплитудного волоконно-оптического преобразователя отражательного типа, в отличие от функций преобразования, полученных другими исследователями, состоит в том, что она дает возможность теоретически строго исследовать поведение функции преобразования в особых точках и интервалах методами математического анализа и на основе сравнительного анализа функций преобразования (рис. 2) определить оптимальный вариант построения приемо-передающих каналов с различными типами оптических волокон с учетом их оптических и геометрических параметров.

Максимальное значение функции преобразования определяется с помощью первой производной, график которой представлен на рис. 3. Он расположен в положительной и отрицательной областях системы координат. Это говорит, как и следовало ожидать, о наличии восходящего и нисходящего участков у самой функции преобразования. Точка пересечения производной с осью абсцисс дает точные координаты точки максимума функции преобразования. В рассматриваемом случае максимум функции преобразования находится на расстоянии $z_{max} = 773$ мкм от мембраны.

Полученное с помощью производной точное положение точки максимума функции преобразования дает богатую информацию о процессе засветки отраженным кругом торца приемного световода.

Дело в том, что нахождение торцов световодов приемо-передающего канала на расстоянии $z_{max} = 773$ мкм от мембраны говорит о том, что круг излучения засвечивает только часть торца приемного световода и его радиус находится на расстоянии 448 мкм от оси канала (общей оси приемного и направляющего световодов) (рис. 4).

Это положение отличается от мнения, высказанного в [6, с. 6]: «С увеличением площади отраженного «пятна» ... наблюдается резкий рост принимаемого потока. При

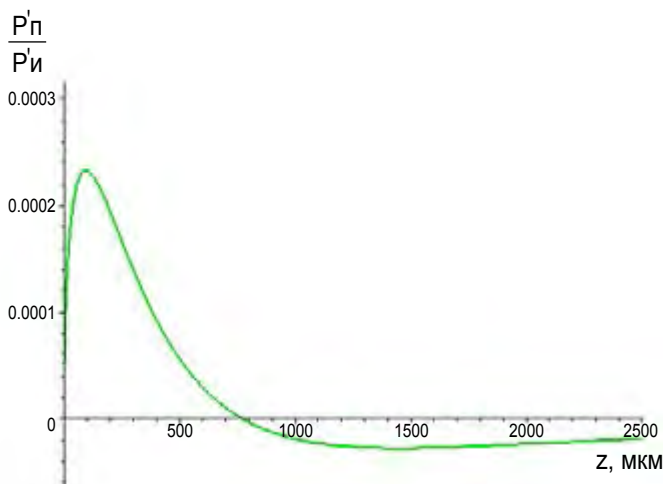


Рис. 3. График первой производной функций преобразования, представленной на рис. 2 зеленой линией

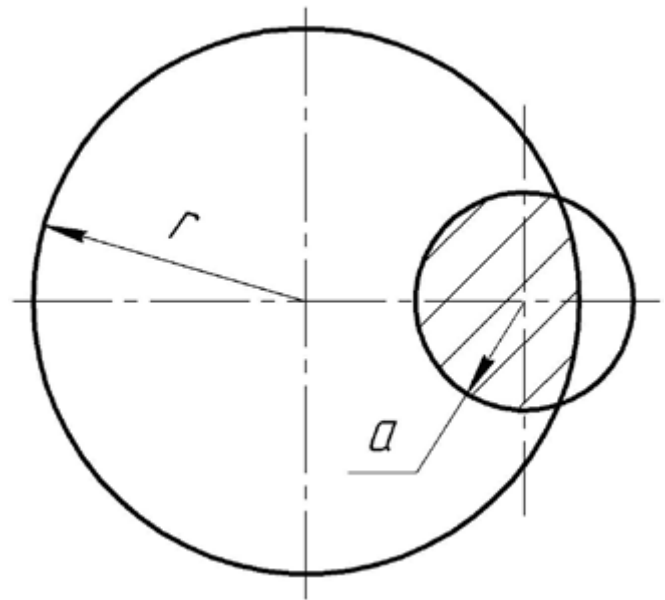


Рис. 4. Положение круга отраженного от мембраны излучения на приемном торце передающего световода при расположении последнего на расстоянии z_{max}

определенном соотношении размеров торцов крутизна изменения потока растет до тех пор, пока границы отраженного «пятна» не выйдут за пределы торца приемного световода». На наш взгляд, полученный нами результат, свидетельствующий о том, что максимум функции преобразования соответствует засветке только части торца передающего световода, представляется более интересным и объективным, поскольку наше рассмотрение учитывает не только «заполнение» отраженным кругом торца передающего световода, но и удаление торца от мембраны. Перемещение мембраны относительно торцов световодов является причиной, по которой засвеченный круг излучения является кругом с переменным радиусом. Поэтому с увеличением этого радиуса происходит не только засветка торца передающего световода, но и уменьшение плотности мощности излучения в этом круге вследствие его удаления от излучающей мембраны. Границей этих двух процессов является радиус засвеченного круга, соответствующий расстоянию z_{max} . При этом засвечивается не весь торец световода, а только его часть.

Дальнейшее исследование производной показывает, что график производной имеет восходящий и нисходящий участки с резко выраженным максимумом. Такое поведение производной говорит о наличии у функции преобразования точки перегиба. Координаты точки перегиба дает вторая производная функции, а точнее координаты пересечения графика второй производной с осью абсцисс. График второй производной функции преобразования представлен на рис. 5.

Проведенные расчеты и построения дают значение точки перегиба $z = 95$ мкм. При расстоянии между мембраной и торцами световодов в 95 мкм приемо-передающий канал имеет наибольшую чувствительность изменения относительной мощности при перемещении мембраны в 1 мкм, которая равна $2,4 \times 10^{-4}$ мкм⁻¹.

Наличие у второй производной еще одного значения, при котором она равна нулю, дает еще одну точку перегиба функции. Эта точка находится на расстоянии 1447 мкм. Чувствительность датчика (красная линия) в этой точке равна

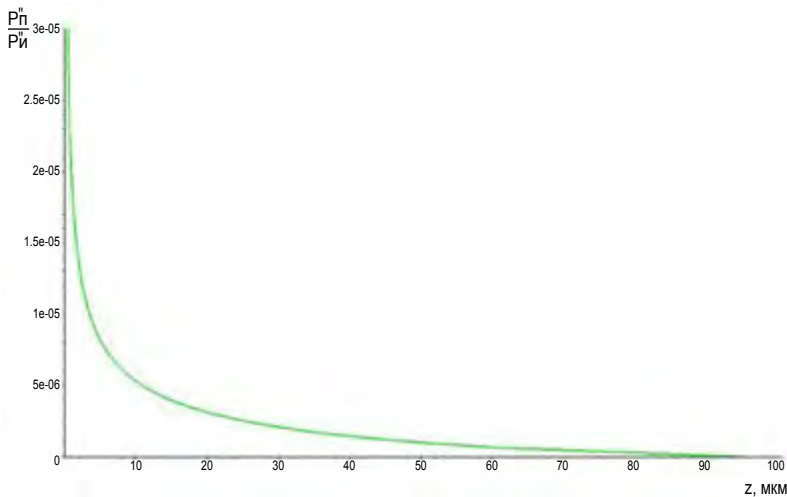


Рис. 5. График второй производной функции, представленной на рис. 2 зеленой линией

$3 \times 10^{-5} \text{ мкм}^{-1}$. Нисходящий участок функции преобразования имеет более низкую чувствительность, чем восходящий, но отличается большим диапазоном измерений.

Исходя из линейности функции преобразования, торцы световодов приемо-передающего канала должны располагаться на расстоянии 150–400 мкм от мембраны. При средних значениях перемещения мембраны в 100–150 мкм такое расположение торцов световодов является оптимальным и соответствует наибольшим значениям чувствительности и линейности датчика.

Выводы

1. Показана эффективность использования полученных математических зависимостей оптического соединения оптических волокон для расчета и оптимизации параметров

амплитудных волоконно-оптических преобразователей отражательного типа.

2. Приведенные математические зависимости позволяют на стадии разработки и проектирования оперативно получать и исследовать функции преобразования оптических датчиков для измерения давления, уровня жидкости, механических перемещений.

3. Исследования, выполненные на основе полученных математических зависимостей, выявили преимущество амплитудных волоконно-оптических преобразователей отражательного типа на основе оптических волокон «кварц-полимер» по сравнению с преобразователем на основе оптических волокон «кварц-кварц» в обеспечении малых потерь излучения в зоне измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев В.А., Ларин Ю.Т., Летяго А.Г., Мартыанов А.Н., Прядко В.И., Рахманов А.А. Некоторые вопросы теории использования оптических линий передачи для измерения физических величин // Кабели и провода. – 2014. – № 1 (344). – С. 28–30.
2. Ларин Ю.Т., Нестерко В.А. Полимерные оптические волокна // www.informost.ru: портал о Радиоэлектронике и Телекоммуникациях. 2002. URL: <http://www.rit.informost.ru/rit/4-2002/28.pdf> (дата обращения: 12.11.2013).
3. Ларин Ю.Т. Оптические волокна типа «кварц-полимер» // портал о Радиоэлектронике и Телекоммуникациях. 2004. URL: <http://siblec.ru/index.php4> (дата обращения: 12.11.2013).
4. Красюк Б.А., Корнеев Г.И. Оптические системы связи и световодные датчики. – М.: Радио и связь, 1985. – 195 с.
5. Гуляев Ю.В., Потапов В.Т. Волоконно-оптические датчики физических величин // Доклад АН СССР. – 1981. – Т. 258, № 3. – С. 598–600.
6. Зак Е.А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией. Б-ка по автоматике. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – Вып. 670. – 128 с.



Вертикальный эмальагрегат, установленный на заводе Камкабель



Генеральный директор фирмы Ньютек г-н Фурио Мелоне получает диплом от завода Камкабель



Во время выставки Sabex 2014, проходившей в Москве с 11 по 14 марта 2014 года, фирма New Tech была награждена ООО «Камский кабель» как лучший поставщик оборудования года. Мы гордимся этой номинацией. Удовлетворение запросов наших клиентов – это наша цель!