

УДК 621.383.92

Г. В. ВАСИЛЕВСКИЙ,

А. О. ЗЕНЕВИЧ, доктор техн. наук, профессор;

А. А. ЛАГУТИК, мл. науч. сотрудник;

Т. М. ЛУКАШИК,

Е. В. НОВИКОВ, канд. техн. наук, доцент,

Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»

Исследование характеристик отраженного излучения в оптическом волокне как основы создания волоконно-оптических датчиков

Выполнены исследования рефлектограмм обратного рассеянного излучения в оптическом волокне при наличии в волокне макроизгиба. Предложен тепловой датчик на основе оптического волокна, основанный на анализе характеристик отражения оптического излучения от торца оптического волокна. Дана оценка возможности использования в качестве теплового датчика различных типов оптических волокон. Определены длины волн оптического излучения, на которых тепловой датчик функционирует наиболее эффективно.

Ключевые слова: оптическое волокно; макроизгиб; коэффициент затухания.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы волоконно-оптические линии связи находят широкое применение для передачи информации о состояниях различных объектов и отдельных помещений [1]. В качестве оконечных устройств в таких линиях связи достаточно часто применяются электрические датчики. Такие датчики требуют дополнительных устройств по преобразованию электрического сигнала в оптический, что усложняет систему передачи информации. Для исключения таких устройств и упрощения систем передачи информации возможно применять датчики, основанные на определенных свойствах оптического волокна и не требующие этих преобразований.

Основные принципы, на которых базируются современные датчики на оптических волокнах, предусматривают [2]: модуляцию интенсивности оптического излучения, прошедшего через датчик; изменение фазы оптического излучения при воздействии его на датчик; изменение поляризации оптического излучения, изменение частоты оптического излучения.

Датчики, построенные на этих принципах, имеют достаточно сложную систему юстировки или требуют использования дорогостоящих материалов для их создания. В большинстве случаев также необходимо подключение к датчику двух оптических волокон, одно из которых подводит к нему оптическое излучение, а другое отводит излучение от датчика к фотоприемнику [2]. Все это усложняет изготовление таких датчиков и делает их дорогостоящими. В связи с этим весьма интересно рассмотреть возможность создания простых в реализации и недорогих датчиков. Эти датчики могут быть выполнены, например, на основании анализа изменения характеристик отраженного от торца оптического волокна оптического излучения. Подобные датчики не требуют юстировки,

не содержат дорогостоящих материалов, к датчику подводится только одно оптическое волокно, используемое как для подачи оптического излучения на датчик, так и для передачи этого излучения от датчика к фотоприемнику.

Возможность создания датчиков, работающих на этом принципе, в настоящее время недостаточно изучена. Поэтому целью данной статьи является оценка возможности создания волоконно-оптического датчика, основанного на изменении характеристик отраженного от торца оптического волокна оптического излучения.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Описание экспериментальной установки и методики эксперимента

В качестве объектов исследования были использованы одномодовые оптические волокна G652.A и G655.A. Данные оптические волокна часто применяются для изготовления оптического кабеля в Республике Беларусь и обладают достаточно хорошей восприимчивостью к макроизгибам [3; 4]. Под восприимчивостью понимается способность оптического волокна реагировать на появление макроизгиба. В нашем случае такой реакцией на появление макроизгиба будет считаться изменение коэффициента затухания оптического излучения в волокне.

Исследования выполнялись на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

В качестве источника оптического излучения в установке использовался полупроводниковый лазер Л. Существовала возможность использования лазеров с длинами волн оптического излучения 1310, 1490, 1530 и 1625 нм, которые соответствовали окнам прозрачности исследуемых оптических волокон. Длительность оптических импульсов задается при помощи генератора электрических импульсов Г. Электрические импульсы

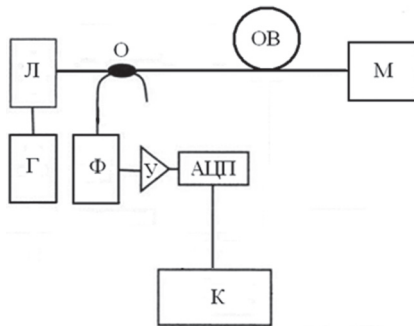


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

Л — полупроводниковый лазер; Г — генератор электрических импульсов; О — оптический ответвитель; Ф — фотоприемник; У — усилитель; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; К — компьютер; М — формирователь макроизгиба; ОВ — оптическое волокно

от генератора Г подавались на управляющий вход полупроводникового лазера Л. В результате на выходе лазера формируются оптические импульсы фиксированной длительности 10 нс с частотой следования 12 кГц. Мощность оптического импульса составляет 100 мкВт.

Оптические импульсы, сформированные лазером Л, поступают на первый вход оптического ответвителя и подаются в оптическое волокно ОВ. Рассеянное в волокне оптическое излучение возвращается к оптическому ответвителю О, после чего поступает на фотоприемник Ф. Фотоприемник Ф преобразует это излучение в электрические сигналы, которые усиливаются усилителем У и поступают на аналого-цифровой преобразователь АЦП. Последний оцифровывает и передает данные на вход компьютера К.

Компьютер К обрабатывает поступившую информацию и отображает ее в графической форме в виде зависимости коэффициента затухания оптического излучения в волокне на единицу его длины от протяженности оптического волокна (рефлектограмма). Компьютер позволяет анализировать рефлектограмму в автоматическом режиме с помощью встроенных программных алгоритмов.

На дальнем конце оптического волокна ОВ находится формирователь макроизгиба М. Последний формирует один виток макроизгиба с диаметром от 5 до 60 мм. При меньших диаметрах макроизгиба возможен излом оптического волокна, а при больших диаметрах не регистрировалось влияния макроизгиба на оптические свойства волокна.

Отметим, что макроизгиб формировался в области мертвой зоны по событию. Под мертвой зоной по событию понималась длина оптического волокна, на которой невозможно различить два находящихся рядом отраженных оптических импульса. Длина мертвой зоны, соответствующая длительности оптического импульса 10 нс и используемым длинам волн, составляла в нашем случае 15 м. Расстояние от торца оптического волокна,

на котором формировался макроизгиб, составляло 0,2 м.

Коэффициент затухания на единицу длины D волокна определялся по формуле:

$$D = \frac{10}{l} \lg \left(\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} \right), \quad (1)$$

где $P_{\text{ВХ}}$ — мощность оптического излучения на входе оптического волокна; l — длина оптического волокна; $P_{\text{ВЫХ}}$ — мощность оптического излучения после прохождения в оптическом волокне расстояния l .

Оптический импульс, отраженный от торца оптического волокна, создает отклик на рефлектограмме. Амплитуда ΔD этого отклика определялась на основании рефлектограммы по следующей формуле:

$$\Delta D = D_2 - D_1, \quad (2)$$

где D_2 — максимальное значение отклика рефлектограммы, соответствующее оптическому импульсу, отраженному от торца оптического волокна; D_1 — значение отклика рефлектограммы, для которого коэффициент затухания на единицу длины отличается от его значения для стабильного уровня обратного рассеяния на 0,5 дБ.

Измерения проводились при постоянной температуре 320 °К, которая соответствовала температуре срабатывания рассматриваемого варианта теплового датчика.

Результаты измерения и их обсуждение

В процессе исследований выполнялся анализ рефлектограмм, полученных при помощи рассмотренной экспериментальной установки. Рефлектограммы для случаев наличия и отсутствия макроизгиба на конце волокна G652.A показаны на рис. 2. Как следует из рис. 2, для этого волокна при определенных небольших значениях диаметра макроизгиба отклик, создаваемый отраженным от торца волокна оптическим импульсом, на рефлектограмме не наблюдается.

Таблица 1

Данные об амплитуде отклика рефлектограммы, вызванного отраженным от торца оптического волокна оптическим импульсом

Диаметр макроизгиба, мм	Длина волны оптического излучения, нм			
	1310	1490	1550	1625
	ΔD для оптического волокна G652.A, дБ/км			
5	0	0	0	0
10	5,3	2,1	0	0
Без макроизгиба	9,2	10,6	11,5	11,5
ΔD для оптического волокна G655.A, дБ/км				
5	2,2	2,5	3,1	3,7
10	10,3	2,8	3,0	3,5
Без макроизгиба	19,6	20,4	20,5	21,3

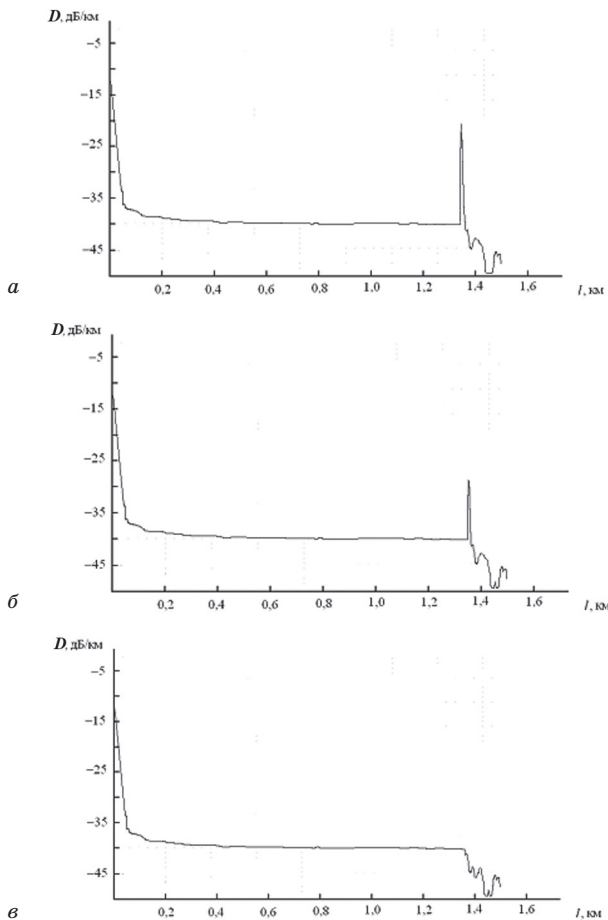


Рис. 2. Рефлектограммы для оптического волокна G652.A: а — без макроизгиба; б — с диаметром макроизгиба 40 мм; в — с диаметром макроизгиба 10 мм

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что при длинах волн оптического излучения 1310 и 1490 нм данный отклик не наблюдается при диаметре макроизгиба 5 мм для оптического волокна марки G652.A. При длинах волн 1550 и 1625 нм отклик на рефлектограммах для этого волокна отсутствует при значениях диаметра макроизгиба меньших 10 мм.

Для оптического волокна G655.A при уменьшении диаметра макроизгиба в интервале от 60 до 10 мм прослеживалось уменьшение амплитуды импульса отраженного от торца оптического волокна отклика. Однако при изменении диаметра макроизгиба в интервале от 10 до 5 мм наблюдался рост амплитуды этого отклика (см. табл. 1). Отметим, что для этого волокна при различных диаметрах макроизгиба не наблюдалось эффекта, связанного с исчезновением отклика, как это показано для волокна G652.A на рис. 2.

Такое различие в поведении оптических волокон разных марок связано с отличием их внутренней структуры. Это отличие приводит к тому, что они по-разному реагируют на появление макроизгиба. Появление макроизгиба приводит к увеличению коэффициента затухания оптического

излучения в волокне. Рост коэффициента затухания обусловлен двумя причинами. Первая из них связана с тем, что в области макроизгиба волокна центр модового пятна смещается относительно его оси на некоторую величину x [5]. Данная величина x зависит от диаметра макроизгиба волокна. В месте перехода прямой части волокна в изогнутую происходит смещение модового пятна. В результате только часть мощности моды сердцевины прямой части оптического волокна передается в сердцевину изогнутой части, а другая часть этой мощности переходит в моду оболочки и в конечном счете теряется. Вторая причина связана с изменением коэффициентов преломления оптического излучения оболочки и сердцевины волокна в области макроизгиба по сравнению с той частью волокна, где макроизгиб отсутствует [6]. Из-за изменения показателей преломления происходит нарушения закона полного внутреннего отражения в оптическом волокне, и часть оптического излучения выходит за пределы волокна.

Поскольку исследуемые марки оптического волокна имели различную внутреннюю структуру, то и эти причины проявлялись по-разному. Затухание оптического излучения в макроизгибе волокна G652.A, в основном, связано с первой причиной. В волокне G655.A к появлению затухания в области макроизгиба приводит как первая, так и вторая причины. Причем первая причина проявляется более отчетливо в интервале диаметров макроизгиба от 10 до 60 мм, а вторая – от 5 до 10 мм. Преобладанием второй причины над первой в интервале диаметров макроизгиба от 5 до 10 мм обусловлено увеличением амплитуды ΔD отклика при диаметре макроизгиба 5 мм по сравнению с 10 мм (см. табл. 1).

Графики зависимости амплитуды отклика ΔD от величины d_m для оптических волокон G652.A и G655.A показаны на рис. 3.

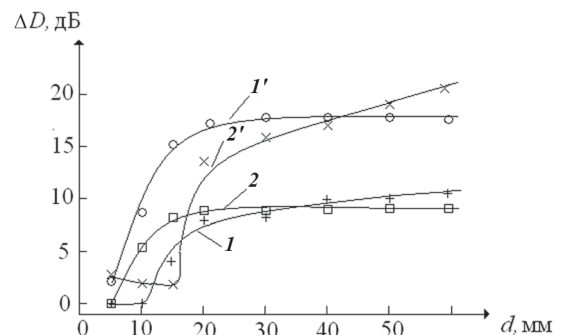


Рис. 3. Графики зависимости амплитуды отклика оптического импульса, отраженного торцом волокна, от диаметра макроизгиба для длины волны оптического излучения 1550 нм: 1, 2 — оптическое волокно марки G652.A; 1', 2' — оптическое волокно марки G655.A

Отметим, что поведения зависимостей ΔD от d_m для длин волн 1310 и 1490 нм были аналогич-

ними для всех марок исследуемых оптических волокон. Также для длин волн 1550 и 1625 нм эти зависимости имели схожий вид. Поэтому на рис. 3 отображены зависимости только для двух длин волн 1310 и 1625 нм. Для длины волны, представленной на рис. 3, значение ΔD для волокна марки G652.A в интервале $d_m = (20 \pm 60)$ мм были меньше, чем для волокна марки G655.A при одинаковых значениях $p_{вх}$ и наличии у них макроизгибов одного и того же диаметра. В этом интервале d_m зависимость ΔD от диаметра макроизгиба имела линейный вид для всех марок исследуемых оптических волокон.

При уменьшении диаметра $d_m < 20$ мм наблюдается достаточно резкое уменьшение амплитуды отклика.

Устройство теплового датчика на основе оптического волокна

На основании выполненных исследований можно предложить конструкцию теплового датчика на основе оптического волокна, которая представлена на рис. 4. Основными элементами теплового датчика являются оптическое волокно, корпус со специальным выступом и плавкий замок. Корпус изготовлен из пластмассы с высокой температурой плавления и имеет на верхней грани ряд прорезей для воздухообмена с внешней средой. Внутри корпуса находится валообразный выступ. При помощи этого выступа и замка создается макроизгиб оптического волокна, как это показано на рис. 4, а. Диаметр валообразного выступа составляет 10 мм. Такой диаметр позволяет сформировать макроизгиб, для которого не наблюдается отраженный от торца оптического волокна импульс. Замок помогает сформировать макроизгиб оптического волокна и удерживает его на валообразном выступе. На боковых поверхностях корпуса теплового датчика также имеются прорези (см. рис. 4, а). Эти прорези необходимы для того, чтобы после расплавления замка при превышении температурой окружающей среды температуры срабатывания датчика происходило выпрямление оптического волокна под действием силы упругости и исчезновение макроизгиба, как иллюстрирует рис. 4, б.

Отметим, что замок выполнен из легкоплавкого сплава, состоящего из 47,7% висмута, 19,1% индия, 8,3% олова, 5,3% кадмия, 22,6% свинца. Температура плавления такого сплава составляет 320 °К.

Основные характеристика теплового датчика представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики теплового датчика

Тип используемого оптического волокна	Температура срабатывания, °К	Диаметр валообразного выступа, мм	Рабочая длина волны оптического излучения, нм	Минимальное расстояние до датчика, м	Длительность импульса зондирования, нс
G652.A	320	10	1625	20	10

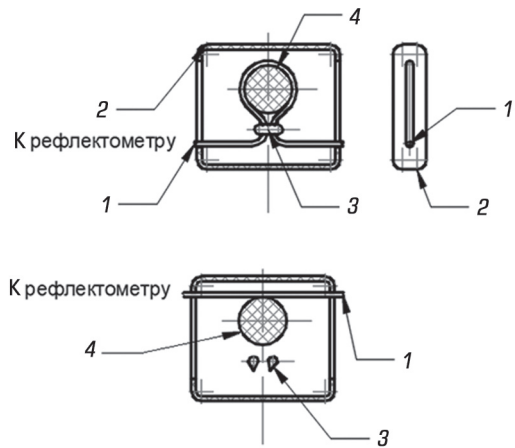


Рис. 4. Чертеж теплового датчика: 1 — оптическое волокно; 2 — корпус; 3 — замок; 4 — валообразный выступ

Диаметр валообразного выступа для теплового датчика выбирался таким, чтобы сформировать макроизгиб с максимальным диаметром, при котором на рефлектограмме не наблюдается отклик, обусловленный отражением излучения от торца оптического волокна. Для работы теплового датчика используется длина волны оптического излучения 1625 нм, поскольку оптическое излучение с длиной волны 1625 нм не применяется в современных волоконно-оптических линиях связи для передачи данных. Использование этой длины волны позволяет применять существующие линии связи для подключения к ним данного теплового датчика и контроля его состояния. Отметим, что для контроля состояния датчика можно использовать обычный оптический рефлектометр.

Под минимальным расстоянием до датчика понимается наименьшая протяженность оптического волокна от рефлектометра до датчика, при которой рефлектометр может определить наличие отраженного оптического импульса от торца оптического волокна и его изменения при наличии макроизгиба. При использовании зондирующего импульса 10 нс это расстояние составляло 20 м.

В случае длительности импульса зондирования сокращается протяженность оптического волокна от рефлектометра до датчика, при которой рефлектометр может определить наличие отраженного оптического импульса. Однако короткие оптические импульсы понижают точность измерения затухания оптического излучения в волоконно-оптической линии. Данный параметр необходимо контролировать, особенно для протяженных волоконно-оптических линий. Поэтому для соблюдения компромисса между сокращением протяженности оптического волокна от рефлектометра до датчика, при которой рефлектометр может определить наличие отраженного оптического импульса, и точностью измерения коэффициента затухания выбирается длительность зондирующего импульса 10 нс.

ВИВОДИ

♦ В процессе проведенных исследований получено, что формирования макроизгиба на конце оптического волокна с диаметром, меньшим 60 мкм приводит к уменьшению амплитуды отраженного от торца этого волокна оптического импульса. Для оптического волокна G652.A существует диаметр макроизгиба, при котором оптический импульс, отраженный от торца оптического волокна, не наблюдается на рефлектограмме. Величина этого диаметра может отличаться для разных типов волокон, а также зависит от длины волны оптического излучения, распространяющегося по волокну.

♦ При постоянном значении диаметра макроизгиба и мощности оптического импульса на входе оптического волокна наблюдалась линейная зависимость между амплитудой оптического импульса, отраженного от торца оптического волокна, и количества витков этого макроизгиба.

♦ Предложена конструкция теплового датчика на основе оптического волокна, в основу работы которого положен эффект появления отраженного от торца оптического волокна отклика при исчезновении макроизгиба волокна при превышении порогового значения окружающей температуры.

Список использованной литературы

1. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
2. Волоконная оптика и приборостроение / М. М. Бутусов, С. Л. Галкин, С. П. Орбинский, Б. П. Пал. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1987. 328 с.
3. Рекомендация МСЭ-Т G652. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля. Женева, 2005.
4. Рекомендации МСЭ-Т G657. Характеристики одномодового оптического волокна и кабеля, не чувствительного к потерям на изгибе. Женева, 2017.
5. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи. М.: ЛЕСА-Парт, 2003. 107 с.
6. Зеневич, А. О. Обнаружители утечки информации из оптического волокна. Минск: Белорус. гос. академия связи, 2017. 145 с.

Рецензент: доктор техн. наук, ст. науч. сотрудник Ю. В. Мельник, Государственный университет телекоммуникаций, Киев.

Г. В. Василевський, А. О. Зеневич, А. А. Лагутик, Т. М. Лукашик, Е. В. Новіков

**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДБИВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНІ
ЯК ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ДАТЧИКІВ**

Виконано дослідження рефлектограм відбиваного розсіяного випромінювання в оптичному волокні за наявності у волокні макроизгибу. Запропоновано тепловий датчик на базі оптичного волокна, заснований на аналізі характеристик відбиття оптичного випромінювання від торця оптичного волокна. Дано оцінку можливості використання як тепловий датчик різних типів оптичних волокон. Визначено довжину хвиль оптичного випромінювання, на яких тепловий датчик функціонує найефективніше.

Ключові слова: оптичне волокно; макроизгин; коефіцієнт загасання.

G. V. Vasylevskiy, A. O. Zenevich, A. A. Lagutik, T. M. Lukashik, E. V. Novikov

**RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF REFLECTED RADIATION IN AN OPTICAL FIBER AS A BASIS
FOR CREATING FIBER OPTICAL SENSORS**

The studies of reflectograms of backscattered radiation in an optical fiber in the presence of macrobending in the fiber are performed. A thermal sensor based on an optical fiber based on an analysis of the reflection characteristics of optical radiation from the end of an optical fiber is proposed. The possibility of using various types of optical fibers as a thermal sensor is estimated. The wavelength of optical radiation at which the thermal sensor operates most efficiently is determined.

Keywords: optical fiber; macrobending; attenuation coefficient.