

КОНТРОЛЬ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА И УСТРОЙСТВ НА ЕГО ОСНОВЕ

Сокольников А. В., Косарев А. В.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева», г.Саранск
E-mail: sokolnikov-av@yandex.ru

Аннотация. Представлены методики и аппаратура для контроля характеристик и параметров оптического волокна, а также результаты исследований на многомодовом оптическом волокне.

Ключевые слова. Оптический волновод, числовая апертура, модовый состав, критический радиус изгиба

Введение

Как известно, в волоконно-оптических датчиках оптическое волокно может применяться просто в качестве линии передачи, а может играть роль самого чувствительного элемента датчика. В последнем случае используются чувствительность волокна к электрическому полю, магнитному полю, к вибрации, температуре, давлению, деформациям (например, к изгибу)[1,2,3].

Современные волоконно-оптические датчики позволяют измерять многие параметры, например, давление, температуру, расстояние, положение в пространстве, скорость вращения, скорость линейного перемещения, ускорение, колебания, массу, звуковые волны, уровень жидкости, деформацию, дозу радиационного излучения и т.д. Таким образом, проблема оценки характеристик и параметров оптического волокна при взаимодействии внешних факторов является актуальной.

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка методик и аппаратуры для контроля характеристик и параметров оптического волокна, а также проведения исследования на одномодовом и многомодовом оптическом волокне.

Экспериментальные исследования проводились на установке, входящей в состав исследовательского комплекса лаборатории квантовой оптической электроники, кафедры микроэлектроники.

На базе данной установки могут быть выполнены следующие работы:

- 1 Качественное исследование модового состава волоконных световодов.
- 2 Экспериментальное измерение числовой апертуры волоконных световодов.
- 3 Экспериментальное измерение потерь, вносимых изогнутым участком волоконного световода.
- 4 Качественное исследование эффекта скремблирования мод, распространяющихся в световоде.

Установка содержит основные узлы и блоки позволяющие генерировать когерентное излучение с помощью полупроводникового лазера (ЛД), вводить это излучение в исследуемый волоконный световод, измерять светопропускание с помощью фотоприёмников или оптических тестеров, анализировать изображение модового состава излучения в световоде с помощью оптической телекамеры, подвергать световод различным внешним воздействиям с помощью узла измерения потерь.

Для выявления картины модового состава излучения в световоде используется получение световой картины на экране монитора с помощью телекамеры расположенной

напротив выходного торца световода. Для анализа световой картины используется осциллограмма выделенной строки изображения, по которой можно определять количественные характеристики.

Для измерения числовой апертуры анализируется излучение из торца возбужденного источником ЛД световода. Выходной торец находится в поле зрения телекамеры и на экране монитора возникает его изображение. Выделение строки изображения с помощью телевизионного осциллографа позволяет анализировать распределение интенсивности в его поперечном сечении.

Структурная схема для исследования оптических волноводов

Структурная схема установки содержит основные узлы и блоки позволяющие генерировать когерентное излучение с помощью полупроводникового лазера, вводить это излучение в исследуемый волоконный световод с помощью оптического излучателя. С помощью фотоприёмников или оптических тесторов измерять светопропускание, с помощью оптической телекамеры анализируют изображение модового состава излучения в световоде, при различных внешних воздействиях.

Структурная схема установки на рис.1. В её состав входят следующие элементы.

1. **Источник оптического излучения – лазерный диод ЛД**, обеспечивающий излучение на длине волны $\lambda = 0,67$ мкм. Мощность излучения зависит от тока накачки I_n и достигает величины 5мВт при $I_n=50$ мА. ЛД размещается в специальной оправке, позволяющей крепить его к элементам юстировочного устройства.

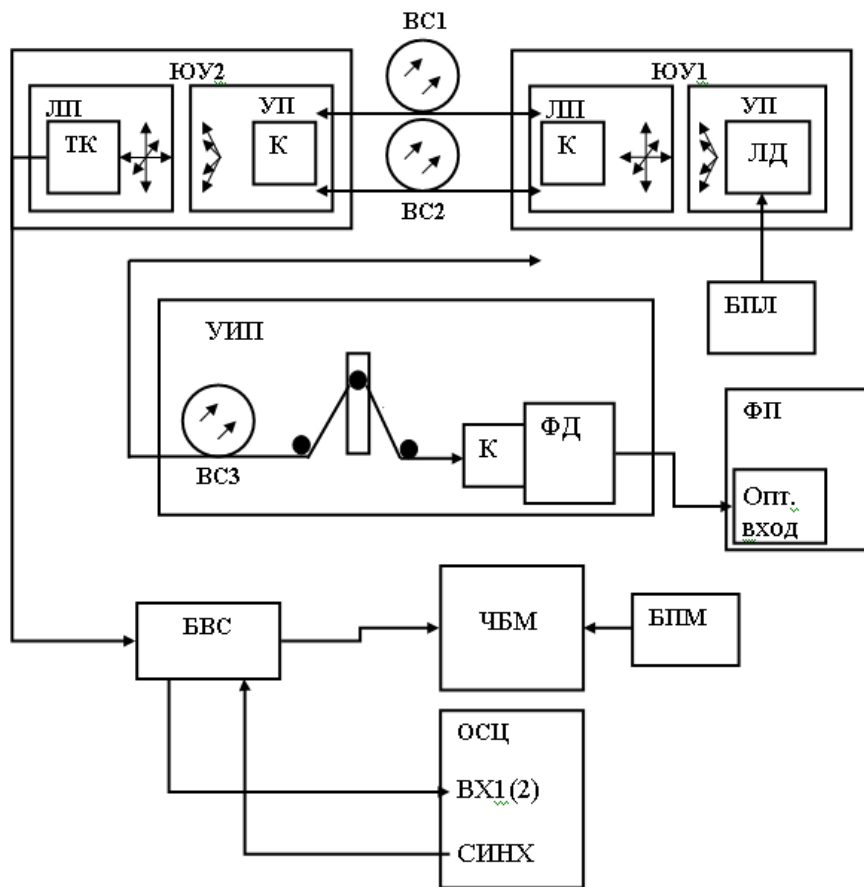


Рисунок 1. Структурная схема установки.

2. Блок питания источника оптического излучения (БПИ).

Блок предусматривает возможность:

- регулировки тока накачки - позволяет изменять мощность излучения лазерного диода;
- переключение пределов изменения тока накачки (5, 50 мА) с помощью кнопочного переключателя;
- регистрации тока накачки с помощью цифрового индикатора

3. **Фотодиод ФД** для регистрации излучения на длине волны $\lambda = 0,67$ мкм размещенный в цилиндрическом корпусе на штативе с разъемом для подключения к блоку фотоприемника.

4. **Фотоприемник ФП** для регистрации излучения на длине волны $\lambda = 0,67$ мкм.

Для контроля оптической мощности на лицевой панели ФП имеется цифровой индикатор «**оптическая мощность, отн. ед.**». Оптическое излучение, попадающее на чувствительную площадку фотодиода, вызывает изменение тока (фототока), протекающего через его *pn* переход. Фототок прямо пропорционален значению оптической мощности на чувствительной площадке фотодиода. Поэтому показания цифрового индикатора пропорциональны этой мощности, но не равны ей. Измерение с помощью фотоприемника осуществляется в относительных единицах.

5. Два отрезка волоконных световодов ВС1,2:

- одномодовый световод без защитной оболочки (желтый цвет буферного покрытия) с коннекторами типа FC –UPS;
- многомодовый световод (зеленый цвет защитной оболочки) с коннекторами типа FC – PC;

6. **Телекамера с микрообъективом (ТК)**, которая служит для анализа излучения из торца исследуемого световода. В поле зрения телекамеры находится один из торцов исследуемого световода.

Телекамера имеет следующие характеристики:

- максимальное разрешение – 700 лин/мм;
- фокусное расстояние объектива $F=4,2$ мм.

7. **Черно-белый монитор (ЧБМ)**, на экране которого наблюдается изображение формируемое телекамерой. В данной установке – это изображение светящегося торца исследуемого световода.

8. **Блок выделения строки (БВС)**, с помощью которого производится выделение строки изображения формируемого телекамерой. Этот сигнал соответствует распределению интенсивности в поперечном сечении исследуемого световода.

10. **Осциллограф (ОСЦ)**. На его вход поступает сигнал с БВС, который соответствует выделенной строке. Поскольку в поле зрения телекамеры находится торец исследуемого световода, в режиме выделения строки осциллограмма представляет собой распределение интенсивности в его поперечном сечении.

11. **Два юстировочных устройства (ЮУ1, ЮУ2)**. Они обеспечивают:

- взаимную юстировку оправки для коннектора (К) торца исследуемого световода и источника ЛД (ЮУ1). Данная регулировка позволяет изменять уровень оптической мощности, вводимой в исследуемый световод, для обеспечения удобства проведения измерений;
- взаимную юстировку торца исследуемого световода и телекамеры (ЮУ2).

12. **Узел измерения потерь на изгибе световода (УИП)**. Эскиз узла приведен на рис.

2. Световод 1, в качестве которого используется либо одномодовый световод без защитной оболочки (желтый цвет буферного покрытия) с коннекторами типа FC –UPS, либо многомодовый световод без защитной оболочки с коннектором типа FC-PC, закрепляется в двух фиксаторах 2 с помощью винтов 3. Отрезок световода между фиксаторами пропускается между подвижными 4 и неподвижными 5 стойками скремблера.

Фиксаторы 2 перемещаются вдоль направляющих 6 при изменении положения подвижных стоек 5. Возвратное движение фиксаторов осуществляется за счет пружин. Фиксаторы, направляющие и пружины закреплены на подвижных основаниях 7. Фиксаторы, направляющие и пружины закреплены на подвижных основаниях 7.

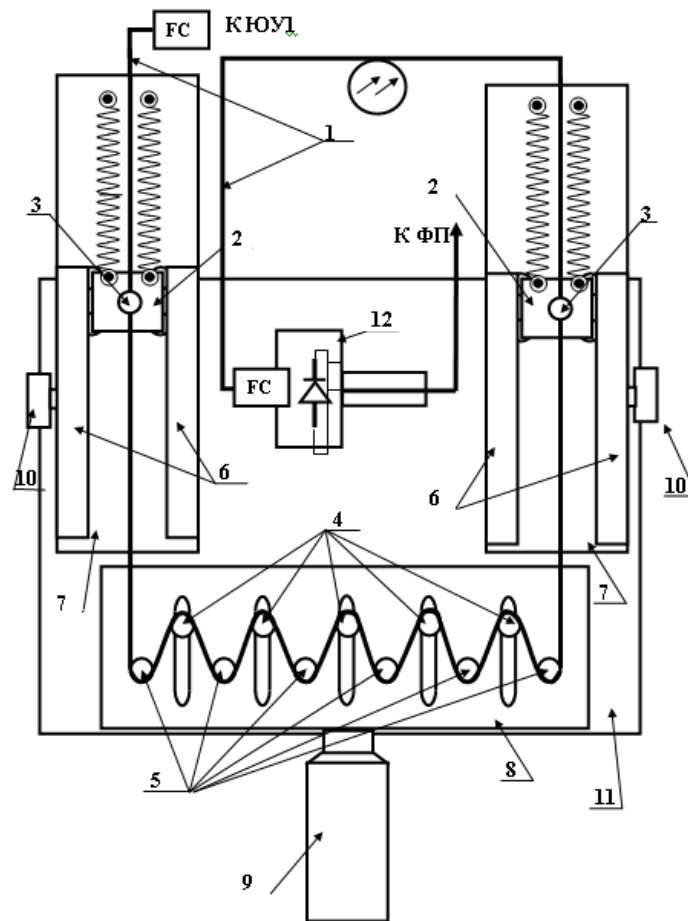


Рисунок 2. Узел измерения потерь на изгибе световода

Шесть неподвижных стоек 4 закреплены на неподвижном основании 8. В нем выполнены продольные пазы, в которых перемещаются пять подвижных стоек 5. Перемещение подвижных стоек осуществляется с помощью микрометрического винта 9.

Методы исследования

а) Качественный анализ модового состава волоконных световодов

Такой анализ проводится для определения причины появления модовых шумов в волоконно-оптической линии связи и при исследовании модового состава излучения в волоконных световодах по распределению их в поперечном сечении.

Оптические волны, падающие на границу раздела сердцевина - оболочка под углом $\theta > \theta_k$ называются направляемыми. Более строгий анализ показывает, что процесс их распространения возможен при выполнении дополнительного условия фазового самосогласования. Это условие «выбирает» из всех возможных зигзагообразных путей только некоторые. В результате направляемые волны образуют дискретный спектр, каждой составляющей которого соответствует своя, свойственная только ей, структура поля (закон изменения составляющих электромагнитного поля в поперечном сечении световода). В литературе такая составляющая спектра носит название «собственных волн световода», «типов волн» или «мод».

Особенностью процесса распространения волн по световоду является то, что зигзагообразный путь, проходимый волнами, различен. Более того, форма пути зависит от длины волны источника, возбуждающего световод. Следовательно, отрезок световода конечной длины каждая мода будет проходить за различное время. С точки зрения передачи информации по волоконной линии, этот процесс порождает ее искажения за счет волноводной дисперсии - каждая составляющая этого спектра проходит отрезок волновода за различное время и на его выходе между ними возникают неустраняемые фазовые сдвиги.

Количество мод, распространяющихся по световоду, связано, прежде всего, с размерами его поперечного сечения. Условно световоды можно разделить на:

- многомодовые ($W \approx 50 \text{ мкм}$);
- одномодовые ($W \approx 10 \text{ мкм}$).

Наличие большого числа мод в световоде без принятия специальных мер приводит к появлению специального источника шумов в волоконной линии (модовый шум).

На практике используются два типа источников для возбуждения световодов:

- когерентный (лазер, лазерный диод);
- некогерентный (светоизлучающий диод).

При работе волокна совместно с лазером на выходном торце волокна все моды имеют за счет когерентности источника стабильное значение фазового набега. В результате они интерференционно складываются, образуя известную «спекл-картину». Если световод многомодовый, то она достаточно сложна и представляет собой практически случайное чередование темных и светлых областей. Качественно она показана на рис. 3.

За счет любого, сколь угодно малого, изменения характеристик распространения волн по волокну (колебания температуры, механическая деформация и др.) «спекл-картина» на торце световода меняется. Поскольку именно она наблюдается на чувствительной площадке фотоприемника, регистрирующего оптический сигнал, этот процесс и вносит дополнительный источник шума.

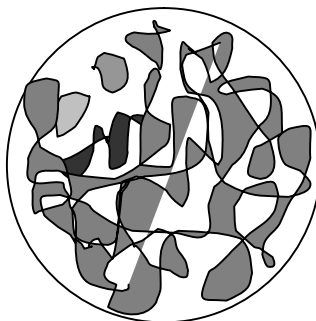


Рисунок 3 . Интерференционная «спекл-картина» на выходном торце оптического волокна

Подобный процесс не будет наблюдаться, если используется некогерентный источник возбуждения. При этом моды на выходном торце волокна уже не когерентны и не могут интерферировать. Они складываются по мощности, образуя равномерную засветку чувствительной площадки фотоприемника. Распределение интенсивности этой засветки не подвержено никаким случайным изменениям.

Второй вариант, устраняющий «модовый шум» в волоконной линии - использование одномодового световода. При этом картинка засветки также стабильна, поскольку она образуется только одной модой, распространяющейся по световоду. Интерференции и в этом случае нет.

Для выявления картины модового состава излучения в световоде используется получение картины на экране монитора с помощью телекамеры расположенной напротив выходного торца световода. Для анализа световой картины используется осциллограмма выделенной строки изображения, по которой можно определять количественные характеристики.

б) Исследования числовой апертуры волоконных световодов

Волоконный световод является главным элементом любой оптической системы связи. Вдоль него распространяются оптические волны и благодаря малому затуханию обеспечивается передача информации на расстояния до 100км без ретрансляции.

С электродинамической точки зрения волоконный световод представляет собой разновидность диэлектрического волновода круглого сечения. Его эскиз приведен на рис.4, где указаны основные его параметры:

- диаметр сердцевины W ;
- диаметр оболочки D ;
- коэффициент преломления сердцевины n_1 ;
- коэффициент преломления оболочки n_2 .

Распространение волн в таком световоде возможно за счет явления полного внутреннего отражения, возникающего на границе раздела сердцевина - оболочка. Для этого необходимо обеспечить условие $n_1 > n_2$. На практике величина скачка коэффициента преломления $\Delta n = n_1 - n_2 \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$.

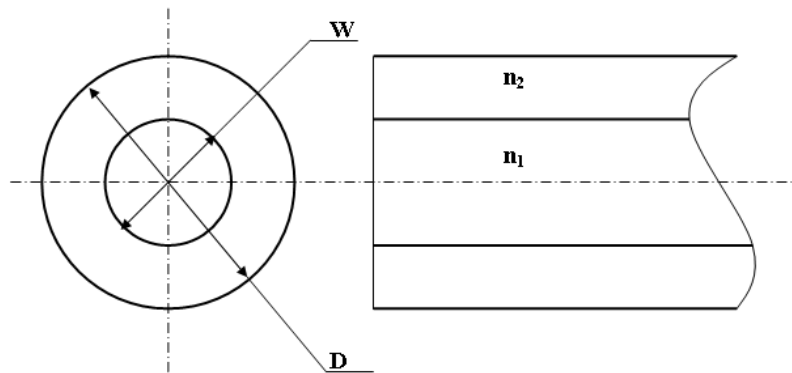


Рисунок 4. Волоконный световод

Качественный анализ процесса распространения волн по световоду можно проводить, используя законы геометрической оптики. Плоская волна падает на границу раздела сердцевина- оболочка под углом θ . Если он превышает критическое значение θ_k (угол полного внутреннего отражения), то волна распространяется вдоль световода без потерь по сложному зигзагообразному пути (рис.5).

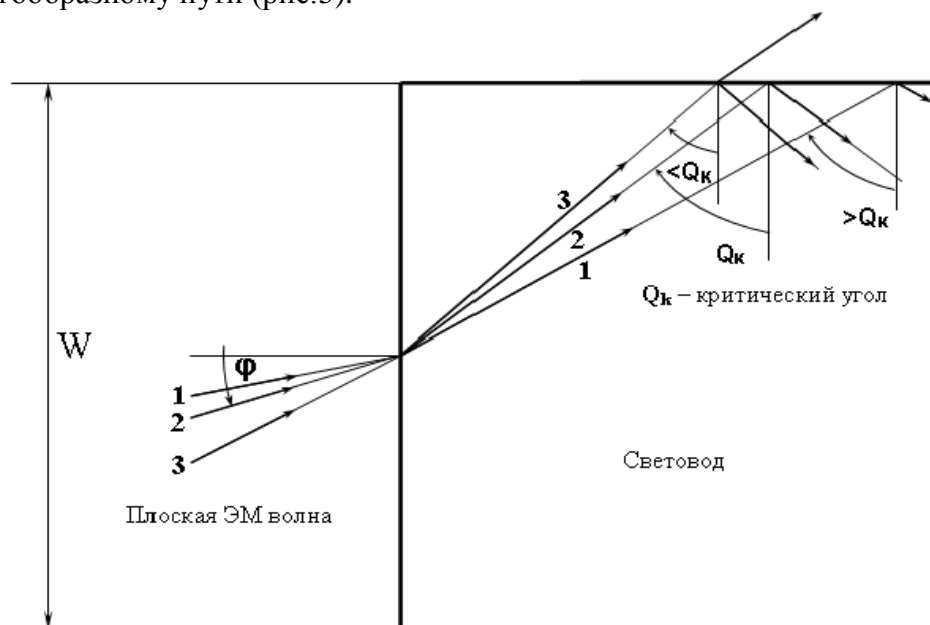


Рисунок 5. Ход лучей в сердцевине волоконного световода

Для того, чтобы волны испытывали полное внутреннее отражение необходимо, чтобы на торец световода (рис.5) они падали под углами не превышающими некоторое значение φ . Последнее определяется параметрами световода n_2 и n_1 . Величина $NA = \sin\varphi$ носит название числовой апертуры и является одним из основных параметров оптического волокна.

Под числовой апертурой NA волоконного световода понимается синус угла φ , под которым луч света, падающий на его торец, испытывает полное внутреннее отражение на границе раздела сердцевина – оболочка. Для ее экспериментального определения исследуется расходимость излучения из торца световода. На рисунке 6 показан ход крайних лучей, выходящих из торца возбужденного световода. Угол φ , который они составляют с осью световода и определяет значение числовой апертуры NA .

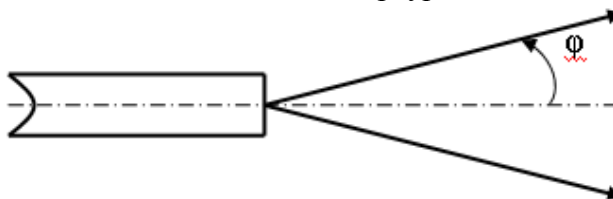


Рисунок 6. Ход крайних лучей, выходящих из торца возбужденного световода

Для измерения числовой апертуры анализируется излучение из торца возбужденного источником ЛД (рисунок 6) световода. Выходной торец находится в поле зрения телекамеры и на экране монитора возникает его изображение. Выделение строки изображения с помощью телевизионного осциллографа позволяет анализировать распределение интенсивности в его поперечном сечении.

На рисунке 7 показан торец световода C и лучи 1, 2, ограничивающие световой конус, в котором концентрируется излучение, выходящее из него.

Лучи попадают на матрицу ПЗС (M на рисунке 7) телекамеры, с помощью которой формируется телевизионный сигнал. На рисунке 7 отмечен диаметр светового пятна t , соответствующий излучению из торца световода на расстоянии F от его торца и горизонтальный размер матрицы T .

Изображение проекции светового конуса на матрицу M наблюдается на экране монитора в виде светлого пятна. С помощью осциллографа и блока выделения строки может быть выделена одна из строк телевизионного сигнала. Примерный вид осциллограммы, соответствующей строке, которая приходится на середину пятна, показан на рисунке 7. Диаметру пятна соответствует размер t , отмеченный на осциллограмме. Горизонтальному размеру матрицы D соответствует на осциллограмме расстояние между соседними строчными гасящими импульсами T . Размер D для используемой в макете телекамеры известен и составляет $D = 5\text{мм}$. Поэтому может быть определен реальный размер пятна D путем измерений по осциллограмме величин t и T :

$$d = t D/T. \quad (1)$$

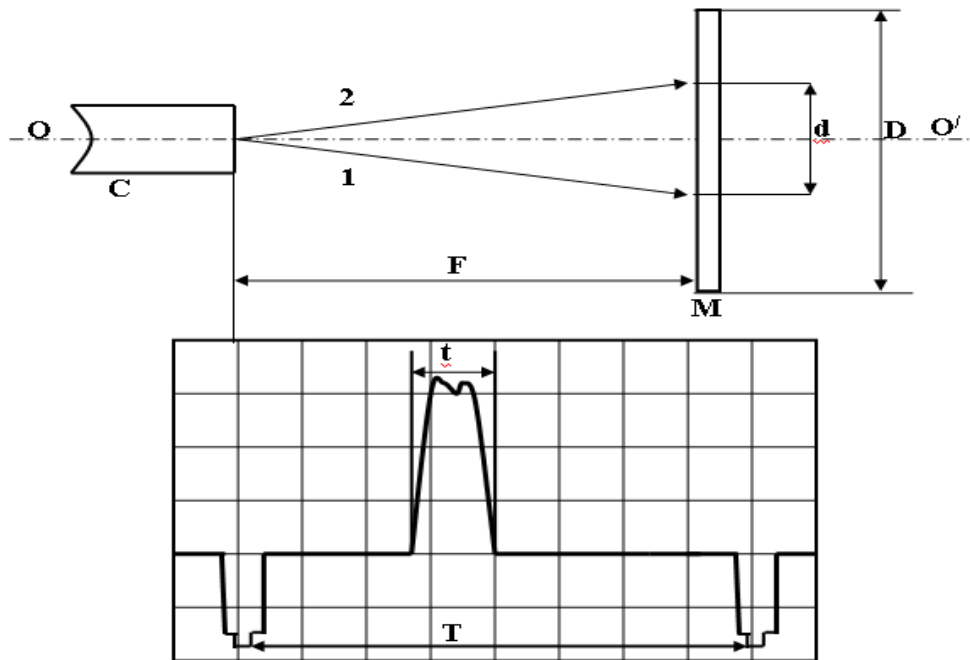


Рисунок 7. Изображение проекции светового конуса на матрицу М

Значение числовой апертуры вычисляется из элементарных тригонометрических соотношений по измеренному значению расстояния:

$$NA = \sin(\varphi) = d / (\sqrt{d^2 + D^2}). \quad (2)$$

в) Измерение удельного коэффициента затухания на изогнутом участке световода

Исследование влияния внешних факторов можно проводить на базе узла измерения потерь (УИП) приведенного на рис.2.

Рассмотрим методику определения потерь на изгибе световода. Световод закреплен на двух фиксаторах (2), а затем пропущен между подвижными и неподвижными стойками скремблера. Перемещение подвижных стоек вверх приводит к изгибу световода.

Радиус изгиба совпадает с радиусом стойки, а длина изогнутого участка изменяется при движении стоек.

Перемещение подвижной стойки 2 отмечается по шкале микрометрического винта (9). Для известного диаметра стойки D и расстояния между стойками $d=20$ мм. Длина изогнутого участка может быть определена следующим образом из пояснений к рисунку 8.

Две окружности представляют собой вид сверху на правую неподвижную и центральную передвигаемую стойки. Линия BAV^1 соответствует неизогнутому отрезку световода, заключенному между ними и является касательной к окружностям в точках B и V^1 . Расстояние между центрами стоек по горизонтали $OS = d = 10$ мм, расстояние между центрами стоек по вертикали $O^1S = L$ определяется в процессе измерений. $BO = V^1O^1 = D/2$ – радиус стойки.

Длина изогнутого участка световода определяется длинами дуг окружностей BC и V^1C^1 (рис.11). Легко понять, что они одинаковы, поэтому полная длина изгиба, определяемая всеми тремя стойками равна $4 \cdot BC$.

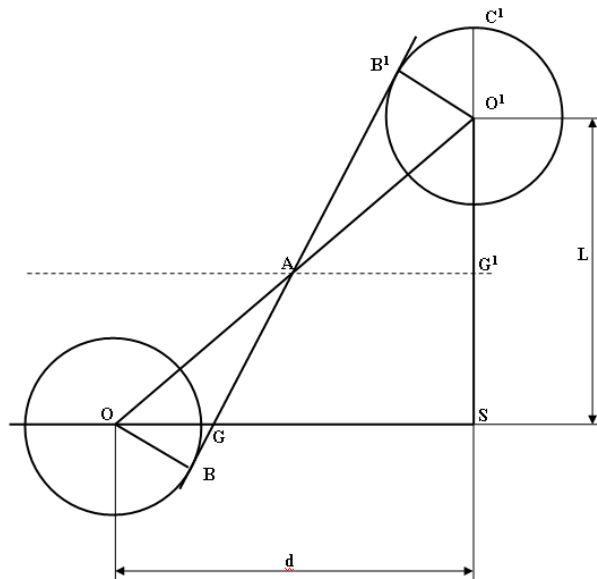


Рисунок 8. Определение длины изогнутого участка световода

Для расчетов следует определить угол BOC . Из элементарных тригонометрических соотношений следует:

$$\text{BOC} = \text{OGB} = \text{B}^1\text{AO}^1 + \text{O}^1\text{AG}^1;$$

$$\text{B}^1\text{AO}^1 = \arcsin((D/(L^2 + d^2))^{1/2});$$

$$\text{O}^1\text{AG}^1 = \arctg(L/d).$$

Окончательно, полная длина изогнутого участка l определится выражением:

$$l = 2 D (\arcsin((D/(L^2 + d^2))^{1/2}) + \arctg(L/d)).$$

Все углы должны быть выражены в радианах.

Величина удельного коэффициента затухания γ , соответствующая участку длины l определяется соотношением:

$$\gamma_i = 10 \cdot \text{Lg}(q_0/q_i)/l.$$

Значение удельного коэффициента затухания определяется путем усреднения значения γ_i по всем результатам измерений.

Результаты исследования оптико-волоконных структур

1. Модовый состав излучения в волоконном световоде

На указанной установке был исследован модовый состав многомодового волоконного световода по распределению интенсивности в его поперечном сечении.

С помощью потенциометра, расположенного на лицевой панели БПИ был установлен ток накачки лазерного диода $I_n = 25$ мА.

Выходной торец световода располагается напротив телекамеры. Изменяя угловое положение торца световода относительно телекамеры, добился появления изображения торца световода на экране монитора.

Изменяя угловое положение ЛД относительно торца световода и перемещая оправку со входным торцом световода в двух поперечных направлениях относительно ЛД2, добился появления на выходном торце световода светового пятна, которое наблюдается на экране монитора.

Перемещая телекамеру в продольном направлении добиваемся четкого изображения светящегося торца световода в центре экрана монитора.

Плавное увеличение величины тока накачки приводит к тому, что проявляется модовая структура исследуемого световода. Размеры поперечного сечения и значения коэффициентов преломления анализируемого световода обеспечивают одномодовый режим на длине волны $\lambda = 1,3$ мкм. В данном эксперименте используется источник с $\lambda = 0,67$ мкм. Поэтому световод

уже не является одномодовым. В нем могут распространяться порядка 5 мод. Это обстоятельство делает картину распределения интенсивности в поперечном сечении регулярной.

2 Числовая апертура волоконных световодов

На указанной установке было произведено экспериментальное определение числовой апертуры многомодового световода.

С помощью потенциометра было установлено значение тока накачки лазерного диода $I_n = 25 \text{ мА}$.

Изменяя угловое положение торца световода относительно телекамеры и перемещая телекамеру в двух поперечных направлениях, добился появления изображения торца световода на экране монитора.

Изменяя угловое положение ЛД относительно торца световода и перемещая оправку со входным торцом световода в двух поперечных направлениях относительно ЛД, добиваемся появления на выходном торце световода светового пятна, которое наблюдается на экране монитора.

Таблица 1. Измерение числовой апертуры многомодового волоконного световода. $T = 15$; $R = 20$.

t_i (дел)	R_i (дел/мксек)	F_i (мм)	d_i (мм)	NA
10	20	7	3.33	-----
9.6	20	6.7	3.16	0.49
9.2	20	6.4	3.03	0.44
9	20	6.1	2.97	0.37
8.8	20	5.8	2.90	0.33
8.3	20	5.5	2.73	0.37
8	20	5.2	2.64	0.35
7.8	20	4.9	2.57	0.34
7.5	20	4.6	2.47	0.33
7.2	20	4.3	2.37	0.33
7	20	4	2.31	0.32

3 Исследование коэффициента затухания в волоконном световоде. Определение критического радиуса изгиба световодов

По указанной методике было произведено экспериментальное определение зависимости удельного коэффициента затухания от длины изогнутого световода.

Установив лазерный диод ЛД и входной торец световода в положение, обеспечивающее ввод оптического излучения в световод, производил тщательную юстировку относительного положения ЛД и входного торца световода, обеспечив максимальные показания измерительного прибора. Отметив показания измерительного прибора q_0 , соответствующий максимальной мощности на выходном торце невозмущенного световода.

Установив положение подвижных стоек отмечал отсчеты L_i по шкале микрометрического винта и соответствующие им отсчеты q_i по прибору «Оптическая мощность» электронного блока «Фотоприемник».

Измерения потерь проводили для диаметров изгиба 3,5,7 мм. Для этого на стойки одевали втулки соответствующего диаметра.

После окончания измерений определили длину изогнутого участка l и вычисляли длины изогнутого участка l , и удельный коэффициент затухания на изгибах указанных ранее диаметров от длины изогнутого участка при диаметре стержня $D=3$ мм.

На рисунке 4 показана зависимость удельного коэффициента затухания в оптическом волокне от длины изогнутого участка на стержне диаметром 3мм.

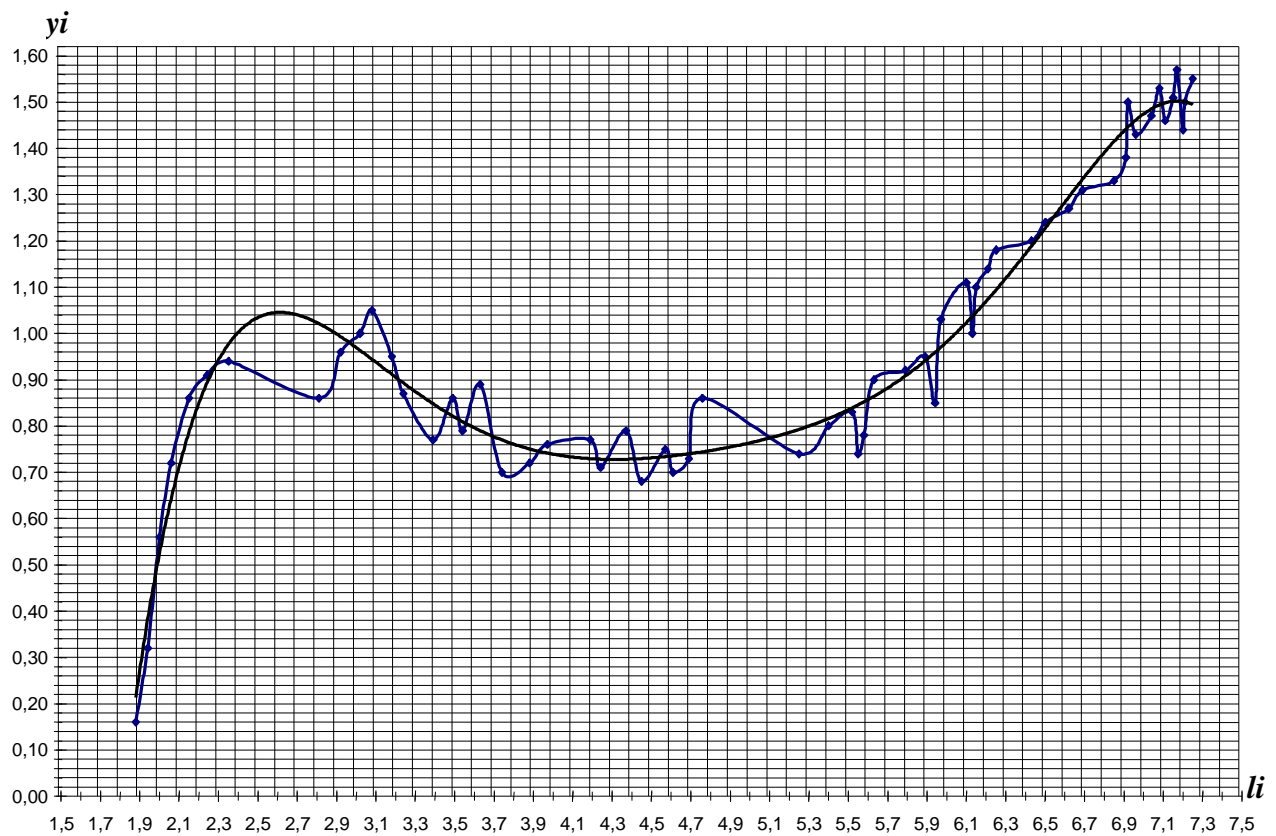


Рисунок 4–Зависимость удельного коэффициента затухания от длины изогнутого участка при диаметре стержня $D = 3$ мм

Обсуждение результатов

1. Исследование модового состава излучения в волоконном световоде

Результаты приведённые в разделе 3.1 свидетельствуют о том, что модовый состав излучения в световодах двух типов имеет очень сложный характер который зависит от внешних воздействий на световод (изгиб, кручение, давление и т. д.). Поэтому точных количественных зависимостей для эффекта полного внутреннего отражения получить не удалось. Мы полагаем, что более достоверная информация об эффекте нарушения полного внутреннего отражения может быть получена из интегральной составляющей мощности всех мод излучения в оптическом волокне, т.е. о зависимости коэффициента затухания излучения от радиуса изгиба волоконного световода.

2. Исследование числовой апертуры волоконного световода

Результаты исследования позволяют определить числовую апертуру волоконных световодов, что необходимо при расчетах затухания в оптических волноводах при различных условиях. Числовая апертура слабо зависит от тока накачки.

Для оптического многомодового волновода получено значение числовой апертуры $NA = 0.36$.

3. Исследование коэффициента затухания в волоконных структурах с нарушением полного внутреннего отражения

Результаты исследования коэффициента затухания при различных диаметрах стержней формирующих определенные участки изгиба волоконных световодах показывают что коэффициент затухания растёт с уменьшением диаметра стержня от 7 мм до 3 мм.

Усреднённые коэффициенты затухания составляют:

$$\begin{aligned} \gamma &= 0.16, & \text{где диаметр стержня} &= 7 \text{ мм,} \\ \gamma &= 0.43, & \text{где диаметр стержня} &= 5 \text{ мм,} \\ \gamma &= 0.98, & \text{где диаметр стержня} &= 3 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Для определения критического радиуса изгиба волоконного световода, необходим детальный анализ графиков зависимости удельного коэффициента затухания от длины изогнутого участка.

Критический радиус вычисляется из того графика на котором наблюдается максимальное затухание при соответствующей длине изгиба участка световода на стержне определённого диаметра.

$$\ell = \pi / R_{кр} ,$$

$$R_{кр} = \frac{\ell}{\pi}$$

$$3\text{мм, } R_{кр} = 2.32 \text{ мм,}$$

$$5\text{мм, } R_{кр} = 2.38 \text{ мм,}$$

$$7\text{мм, } R_{кр} = 4.17 \text{ мм.}$$

Достоверным результатом можно считать $R_{кр} = 2.32$ мм т.к. для больших диаметров 7 мм и 5 мм коэффициент затухания значительно меньше.

Для исследуемого волоконного световода $R_{кр} = 2.32$ мм

Список использованной литературы

1. Бусурин В.М. Оптоэлектронные преобразователи на основе управляемых светодиодных структур // В.И. Бусурин, В.Ф. Лярский, В.И. Садовников, Н.П. Удалов. М.: Радио и связь, 1984.
2. Затыкин А.А. Взаимодействие излучения с поглощающей средой на участке световода с крутым изгибом/А.А.Затыкин, С.К.Моршев, А.В. Францесов // Квантовая электроника. – 1983. – №11. – С. 2283-2288.
3. Патлах А.Л. Сверхпропускание изогнутых многомодовых оптических волокон //А.Л.Патлах, А.С. Семенов// Квантовая электроника. –1983. – №4.– С.868-870.