

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Кафедра общей физики

А. Ю. Игуменов, В. В. Бурдин

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В МНОГОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Учебно-методическое пособие

МОСКВА
МФТИ
2024

УДК 535(075)
ББК 22.343я73
И28

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент *Ю. Н. Филатов*

**Игуменов, Александр Юрьевич,
Бурдин, Владислав Викторович**

И28 Распространение света в многомодовом оптическом волокне : учеб.-метод. пособие / А. Ю. Игуменов, В. В. Бурдин ; М-во науки и высшего образования Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (нац. исслед. ун-т). – Москва : МФТИ, Физтех, 2024. – 24 с.

Учебно-методическое пособие посвящено экспериментальному определению длины оптического волокна по времени распространения излучения в нем, оценке числовой апертуры и дисперсии многомодового оптического волокна. Приведены необходимые теоретические сведения, подробное описание оборудования и экспериментальной установки, даны методические рекомендации по обработке результатов измерений. В работе используются лазерный диод, объектив микроскопа, держатели волокна с магнитными прижимами, катушки многомодового волокна длиной от 1100 м, фотоприемник, осциллограф, оптическая скамья.

Предназначено для физических, инженерно-физических и физико-технических специальностей вузов.

Учебное издание

**Игуменов Александр Юрьевич
Бурдин Владислав Викторович**

**Распространение света
в многомодовом оптическом
волокне**

Учебно-методическое пособие

Редактор *Н. Е. Кобзева*. Корректор *И. А. Волкова*

Компьютерная верстка *Н. Е. Кобзевой*

Подписано в печать 15.05.2024. Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,5.

Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 20 экз. Заказ № 68.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Тел. (495) 408-58-22, e-mail: rio@mipt.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Тел. (495) 408-84-30, e-mail: polygraph@mipt.ru

- © Игуменов А. Ю., Бурдин В. В., 2024
- © Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», 2024

Содержание

Введение	4
1. Теоретические сведения.....	4
1.1. Принцип работы волоконного световода. Числовая апертура....	4
1.2. Моды ВС	6
1.3. Межмодовая дисперсия	9
2. Используемое оборудование	11
2.1. Описание модулей.....	11
2.2. Подготовка волокна	18
3. Методика проведения эксперимента	19
3.1. Сборка и подготовка установки к измерениям.....	19
3.2. Числовая апертура волокна	20
3.3. Измерение времени распространения излучения	20
4. Ход работы	22
Задание 1. Определение длины оптоволокна.....	22
Задание 2. Определение числовой апертуры оптоволокна.....	22
Вопросы к сдаче работы.....	23
Список литературы.....	24

Цель работы: экспериментально определить длину оптического волокна по времени распространения излучения в нем; оценить числовую апертуру многомодового оптического волокна.

В работе используются: лазерный диод, объектив микроскопа, держатели волокна с магнитными прижимами, катушки многомодового волокна длиной 1100, 2000 м, фотоприемник, осциллограф, оптическая скамья.

Введение

Оптические волокна, представляющие собой двухслойную нить из оптически прозрачного материала, широко используются для передачи данных в магистральных линиях связи, для создания распределенных и локальных датчиков, разработки лазеров и усилителей мощности. Распространение излучения по оптическому волокну сопровождается различными эффектами, такими как хроматическая, межмодовая, поляризационная дисперсия, фазовая само- и кроссмодуляция, а также многими другими. Изучение этих эффектов открывает возможности увеличения скорости передачи данных, а также даёт ход разработкам различных волоконно-оптических устройств.

В данной работе описана конструкция и основные характеристики оптических волокон. Экспериментальные задания предполагают измерение длины оптоволокна по времени распространения излучения в нем, а также оценку апертуры.

1. Теоретические сведения

1.1. Принцип работы волоконного световода.

Числовая апертура

Оптическое волокно, или *волоконный световод* (ВС), – это двухслойная нить из оптически прозрачного материала. *Внутренний цилиндрический слой* – сердцевина, *внешний слой* – отражающая оболочка. Будем рассматривать кварцевые волокна, сердцевина которых представляет собой кварцевое стекло с легирующими компонентами, повышающими показатель преломления (например, оксидом германия GeO_2). Оболочка может состоять из чистого кварцевого стекла (либо могут быть использованы легирующие компоненты, понижающие показатель преломления, например фтор). Выбор легирующих примесей обусловлен их хорошей растворимостью в кварцевом стекле и близостью теплофизических свойств. На оболочку наносится защитное акрилатное покрытие, не влияющее на распространение излучения.

Волноводное распространение света происходит за счет явления полного внутреннего отражения, которое происходит при падении света

из сердцевины на границу раздела сердцевина–оболочка под углом падения, большим критического. Рассмотрим распространение света в ВС в приближении геометрической (лучевой) оптики. Будем считать, что профиль показателя преломления (зависимость показателя преломления от расстояния до оси ВС) – прямоугольный; показатель преломления сердцевины – n_1 , а затем он резко меняется на границе с оболочкой и в оболочке принимает значение n_2 . Пусть α – угол ввода луча из некоторой среды с показателем преломления n_0 в сердцевину ВС (рис. 1), θ – угол преломления, i – угол падения луча на границу сердцевины и оболочки. Для того чтобы луч полностью отражался от границы, нужно, чтобы угол i превышал предельный угол полного отражения (минимальный угол, при котором возникнет полное отражение). Предельный угол $i_{\text{пред}}$ будет соответствовать максимальному углу α_{max} ввода излучения в ВС или максимальному углу θ_{max} распространения, при котором излучение не выходит в оболочку. Произведение $n_0 \sin \alpha_{\text{max}}$ по определению называется *числовой апертурой* ВС и обозначается NA (*numerical aperture*). В случае если излучение вводится в ВС из воздуха ($n_0 = 1$), числовая апертура просто равна синусу максимального угла ввода излучения.

Выведем выражение для числовой апертуры ВС.

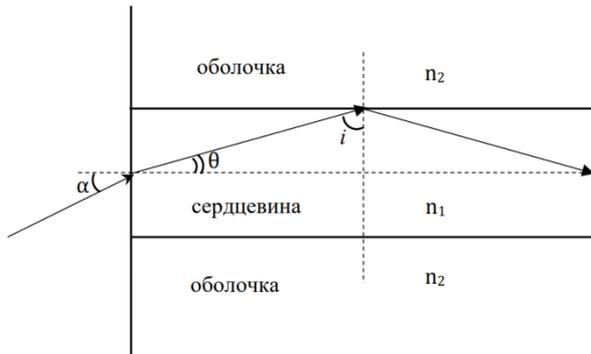


Рис. 1.1. Вход луча света в ВС (к выводу апертуры)

Из законов преломления можно получить выражение для синуса максимального угла ввода излучения в ВС.

$$\begin{cases} n_0 \sin \alpha = n_1 \sin \theta \\ \theta + i = 90^\circ \end{cases} \rightarrow n_0 \sin \alpha = n_1 \cos i$$

Тогда для максимального угла ввода

$$n_0 \sin \alpha_{\text{max}} = n_1 \cos i_{\text{пред}} = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 i_{\text{пред}}}$$

Учитывая выражение для предельного угла полного отражения:

$$\sin i_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_1},$$

получим:

$$NA = n_0 \sin \alpha_{\text{max}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Подчеркнем, что апертура ВС зависит только от показателей преломления сердцевинки и оболочки. Как правило, показатели преломления сердцевинки и оболочки отличаются на $\Delta n \sim 10^{-3} - 10^{-2}$, а показатель преломления кварцевого стекла $n \sim 1,46$. Таким образом,

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)} \approx \sqrt{2n\Delta n}. \quad (1)$$

Отметим, что приближение геометрической оптики корректно использовать при описании распространения излучения в многомодовых ВС. Решая волновое уравнение, для одномодовых ВС нужно определять распределение поля в сердцевинке, однако выражение для апертуры (1) справедливо и для них.

1.2. Моды ВС

Свет, распространяясь вдоль сердцевинки ВС, разбивается на ряд дискретных состояний, которые называются *модами*. С точки зрения геометрической оптики, мода – траектория по которой распространяется свет. Каждой моде соответствует определенный угол θ (или i). С точки зрения волновой оптики каждой моде соответствует определенное устойчивое распределение электромагнитного поля внутри ВС. На рис. 2 представлено распределение модуля напряженности по сечению ВС для первой моды.

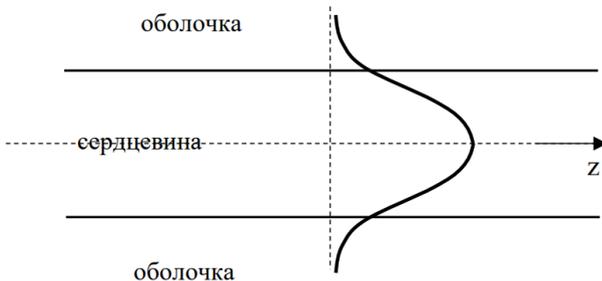


Рис. 1.2. Распределение электрической составляющей поля (модуля вектора напряженности) для первой моды

Зависимость $E(r)$ (r – расстояние от оси ВС) внутри сердцевины представляет собой функцию Бесселя нулевого порядка, а в оболочке – функцию Ханкеля (поле проникает в оболочку!). Приближенно распределение можно представить как гауссово. Заметим, что вектор напряженности направлен перпендикулярно оси z .

Качественно процесс распространения электромагнитных волн по световоду можно представить как комбинацию бегущей волны вдоль оси ВС и поперечной стоячей волны в сечении, граница между сердцевинной и оболочкой выступает в качестве своеобразного резонатора; в результате и возникают дискретные состояния.

Введем важную характеристику ВС, которая называется *нормированной частотой* (другое название – *волноводный параметр*):

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (2)$$

где a – радиус сердцевины ВС.

При большом количестве мод ($N \gg 1$) справедлива следующая оценка для количества мод в цилиндрическом ВС с прямоугольным профилем показателя преломления:

$$N \approx \frac{V^2}{2}.$$

Условие одномодового режима цилиндрического ВС с прямоугольным профилем показателя преломления:

$$V < 2,405.$$

Одномодовые ВС имеют диаметр сердцевины $d \sim 10$ мкм.

Пример 1. Длина волны излучения, распространяющегося по ВС $\lambda = 1,55$ мкм (стандартная длина волны, попадающая в окно прозрачности кварцевого стекла). Показатели преломления сердцевины и оболочки ВС для данной длины волны: $n_1 = 1,465$ и $n_2 = 1,460$. Определите диаметр сердцевины, при котором ВС для данной длины волны будет одномодовым.

Решение:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405,$$

$$d < \frac{2,405\lambda}{\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = 6,33\lambda \approx 9,8 \text{ мкм}.$$

При V от 2,405 до 3,832, помимо первой моды, по световоду могут распространяться сразу еще три моды разной симметрии. В этом случае световод называют *маломодовым*. Ранее было отмечено (рис. 1), что распределение поля внутри ВС таково, что часть излучения проникает в оболочку (рис. 2) и распространяется по ней. При уменьшении V (скажем,

до 2,41) большая часть энергии излучения высших мод распространяется уже по оболочке, а при $V \sim 2,405$ полностью выходит в оболочку, в сердцевине остается только первая мода.

Аналогично, при дальнейшем уменьшении параметра V происходит увеличение доли излучения первой моды, распространяющегося по оболочке. Так, при $V = 2,4$ в оболочку выходит $\sim 10\%$ излучения, а при $V = 2,2$ уже 15% . При этом увеличиваются потери (в оболочке потери выше, чем в сердцевине). Кроме того, увеличиваются потери на изгибе волокна. Почти всегда ВС на каких-то участках линии приходится изгибать, на изгибе изменяется распределение поля внутри ВС, при уменьшении радиуса изгиба большая часть энергии выходит в оболочку. При достаточно малых радиусах можно всю первую моду «выгнать» в оболочку и далее во внешнюю среду. Таким образом, не имеет смысла сильно уменьшать параметр V , делая световод «надёжно» одномодовым. Заметим, прямой цилиндрический ВС всегда, как минимум, одномодовый, уменьшение V приводит к увеличению доли излучения, распространяющегося по оболочке, но всегда какая-то доля остаётся в сердцевине.

Одной из характеристик ВС является длина волны отсечки высших мод. Это минимальная длина волны излучения, при которой ВС является одномодовым.

Пример 2. Показатели преломления сердцевины и оболочки ВС – $n_1 = 1,465$ и $n_2 = 1,460$, радиус – $a = 4,5$ мкм. Определите длину волны λ_c отсечки высших мод.

Решение:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405,$$

$$\lambda > \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2,405} = \lambda_c,$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2,405} = 0,32a = 1,42 \text{ мкм}.$$

Одним из важнейших достоинств распространения излучения по ВС является отсутствие дифракционной расходимости, которая компенсируется рефракцией. Интересно отметить, что условие одномодового режима близко к условию

$$\theta < \varphi,$$

где θ – угол распространения излучения (рис.1), φ – угол дифракционной расходимости:

$$\varphi \sim \frac{\lambda}{d}.$$

1.3. Межмодовая дисперсия

Рассмотрим распространение излучения с длиной волны λ по многомодовому ВС длиной L . При вводе излучения в ВС вся энергия излучения распределяется по модам. Каждая мода распространяется под некоторым углом θ к оси ВС (рис. 1). Для первой моды $\theta \sim 0$. Поэтому время, за которое первая мода проходит весь ВС, минимально и равно

$$t_{min} = \frac{L}{v_1} = \frac{Ln_1}{c},$$

где v_1 – скорость распространения излучения с длиной волны λ по сердцевине ВС.

Для последней, самой высшей моды (рис. 3):

$$\theta = \theta_{max} = 90^\circ - i_{пред.}$$

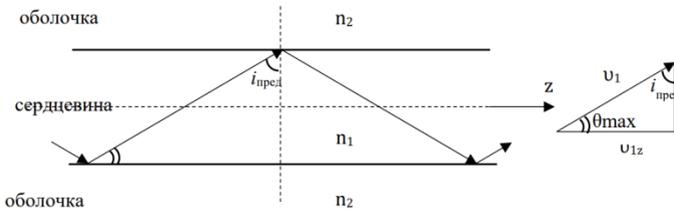


Рис. 1.3. Распространение самой высшей моды ВС

Скорость распространения высшей моды вдоль ВС составляет

$$v_{1z} = v_1 \cos \theta_{max} = v_1 \sin i_{пред.} = \frac{c}{n_1} \cdot \frac{n_2}{n_1} = \frac{cn_2}{n_1^2}.$$

Время, за которое высшая мода проходит весь ВС, максимально и равно

$$t_{max} = \frac{L}{v_{1z}} = \frac{Ln_1^2}{cn_2}.$$

Запаздывание последней моды относительно первой составляет

$$\Delta t = t_{max} - t_{min} = \frac{Ln_1^2}{cn_2} - \frac{Ln_1}{c} = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) = \frac{Ln_1}{c} \cdot \frac{\Delta n}{n_2}.$$

Учитывая, что отличия показателей преломления сердцевин и оболочек составляет несколько тысячных:

$$\Delta t \approx \frac{L\Delta n}{c}. \quad (3)$$

Межмодовая дисперсия – уширение светового импульса при распространении в ВС, вызванная различным временем распространения

мод. Выражение (3) можно рассматривать как выражение для межмодовой дисперсии. При длине ВС порядка 1 км межмодовая дисперсия составляет величину $\Delta t \sim 10$ нс. Например, если в такой ВС ввести импульс с шириной 20 нс, то на выходе ширина импульса составит ~ 30 нс.

При передаче информации по ВС электромагнитное излучение модулируется с некоторой частотой модуляции f_m (в простейшем случае происходит модуляция интенсивности излучения: в волокно вводится последовательность прямоугольных импульсов, по сути, последовательность единиц и нулей, сменяющих друг друга с частотой f_m). Для того чтобы информация «читалась» на выходе из многомодового ВС, очевидно, нужно, чтобы уширение сигнала за счет межмодовой дисперсии (формула (3)) было меньше периода модуляции:

$$\Delta t \leq T_m = \frac{1}{f_m}.$$

Иначе, например, «ноль», приходящий в первой моде наложится на «единицу», приходящую в высшей моде, но вошедшую в световод ранее «нуля». В результате информация из последовательности нулей и единиц сотрётся. Ситуация напоминает размытие интерференционной картины в оптике.

Получаем ограничение на частоту модуляции:

$$f_m \leq \frac{1}{\Delta t} = \frac{c}{L\Delta n}.$$

Для ВС длиной порядка 1 км максимальная частота модуляции составляет ~ 100 МГц. Максимальную частоту модуляции называют *шириной спектра пропускания* ВС. Многоканальную (на разных частотах модуляции) передачу сигналов при помощи многомодовых волокон можно осуществить только на сравнительно коротких расстояниях.

В заключение вкратце отметим, что в одномодовых ВС межмодовая дисперсия отсутствует в принципе. Однако существуют различные типы внутримодовой дисперсии, которые глобально можно разделить на два типа – хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия. *Хроматическая дисперсия* происходит вследствие того, что излучение, вводимое в ВС не строго монохроматическое, спектр излучения имеет некоторую ширину $\Delta\lambda$. В частности, один из подтипов хроматической дисперсии связан, как и в физической оптике, с зависимостью показателя преломления от длины волны. *Поляризационная модовая дисперсия* со случайными (возникающими вследствие флуктуаций плотности и состава стекла) локальными участками анизотропии, возникающими внутри ВС при его изготовлении. Именно она, в конечном счёте, ограничивает широкополосность одномодового ВС, поскольку является принципиально неустранимой. Ширина спектра пропускания современных одномодовых волокон по порядку величины составляет ~ 100 ТГц.

2. Используемое оборудование

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.1.

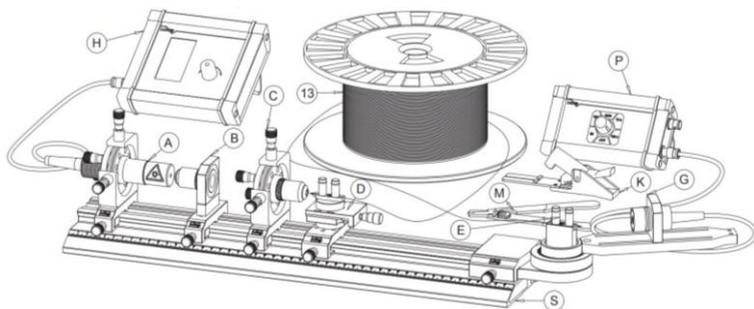


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки

Данная установка позволяет изучать распространение излучения лазерного диода **A** в оптическом волокне **13 (F)**. Установка содержит держатели, коллиматоры и позиционеры, установленные на оптическую скамью **S**, с помощью которых достигается введение излучения в волокно и позиционирование фотоприемника **G** относительно выходного торца волокна. Подавая модулированный оптический сигнал, можно экспериментально определить время распространения излучения в оптоволокне по осциллограммам. Анализ зависимости мощности принимаемого излучения от угла между осью волокна и фотоприемником позволяет оценить числовую апертуру многомодового оптического волокна.

Далее приведено подробное описание используемых модулей.

2.1. Описание модулей

Модуль А

Лазерный диод в корпусе (1) установлен на держателе точной регулировки по четырем осям (рис. 2.2). В корпус встроены охладитель Пельтье и термистор для измерения температуры лазерного диода. Лазерный диод излучает максимальную мощность 50 мВт, как лазер класса 3В. Длина волны составляет 805 нм при минимальном токе инжекции и 807 нм при максимальном токе инжекции.

Модуль В

Объектив микроскопа коллимирует излучение лазерного диода. Объектив ввинчивается в монтажную пластину, поэтому его можно легко снять с держателя планшета и заменить на другой (рис. 2.3).

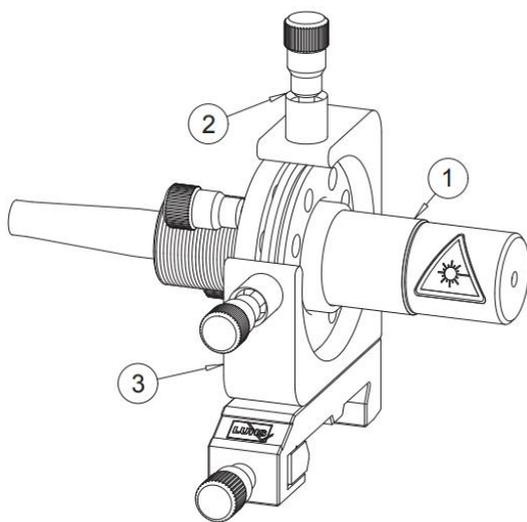


Рис. 2.2. Схема модуля А

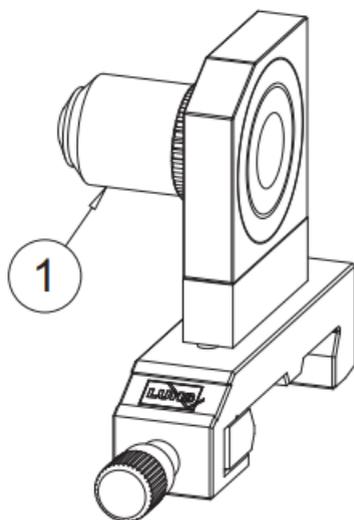


Рис. 2.3. Схема модуля В

Модуль С

Модуль С принципиально такой же, как и модуль В, но с держателем точной настройки с четырьмя осями ХУ, Θ и φ и объективом (1) с меньшим фокусным расстоянием для фокусировки коллимированного излучения лазерного диода для обеспечения эффективной связи с волокном.

Модуль D

Установка рассчитана на работу с многомодовым волокном. Соединение волокна с модулем D осуществляется согласно рис. 2.4. Держатель волокна устанавливается на столике с линейным перемещением в направлении луча.

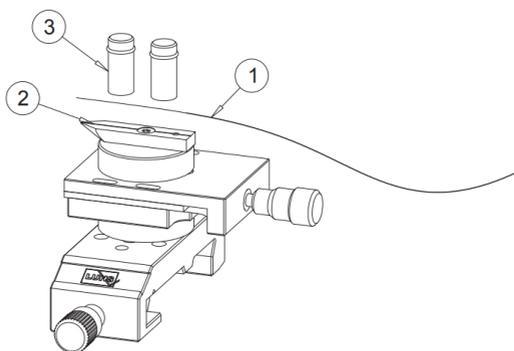


Рис. 2.4. Крепление оголенного волокна к модулю D

Зачищенное и сколотое волокно (1) укладывается в паз держателя 2 и плотно фиксируется двумя магнитами (3).

Модуль F (13)

Модуль F представляет собой многомодовое волокно длиной 1100–5000 м, намотанное в катушку (рис. 2.5). Возможно также использование одномодовых волокон, в которые сложнее ввести излучение.

Модуль E

Второй держатель волокна монтируется на шарнирно соединенном угловом соединителе, но без линейного столика (рис. 2.6). Это устройство позволяет измерять выходную мощность волокна в зависимости от угла.

Модуль G

Этот модуль состоит из детектора с PIN-фотодиодом и установлен на верхней части поворотного рычага модуля E. Поворачивая рычаг, можно измерить распределение интенсивности лазерного диода или выходного волокна с угловым разрешением. Модуль подключается к блоку формирователя сигналов, в котором имеется разъем BNC для подключения выхода либо к осциллографу, либо к цифровому мультиметру.

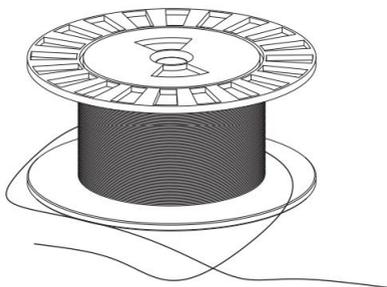


Рис. 2.5. катушка оптического волокна

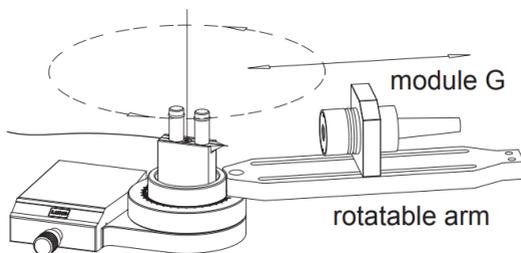


Рис. 2.6. Схема модуля E

Модуль P – блок обработки сигнала фотоприемника ED-0060

Это устройство позволяет подключить фотоприемник к осциллографу (рис. 2.7). Для этого фотоэлектрический ток, пропорциональный числу падающих фотонов, необходимо преобразовать в напряжение. Устройство питается от батареи 9 В. Импеданс выхода можно регулировать в диапазоне от 50 Ом до 100 кОм. Положение «ВЫКЛ.» обеспечивает сопротивление через шунт 1 МОм и позволяет получить сигнал с очень высокой чувствительностью. Для быстрых сигналов используются нижние шунтирующие резисторы. Время нарастания 1 нс можно измерить в положении 50 и 100 Ом.

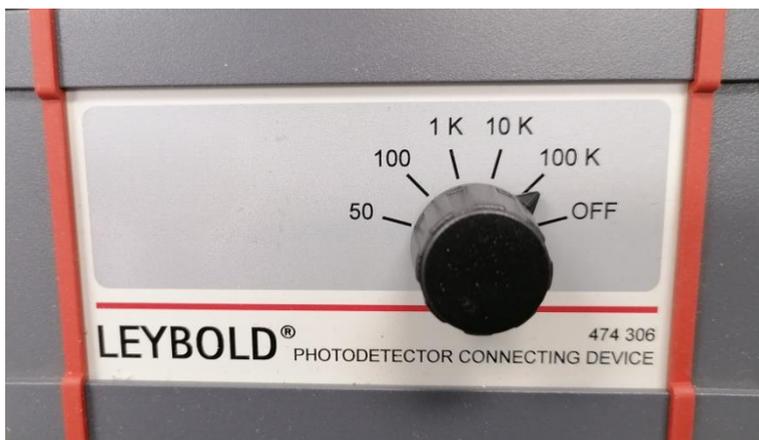


Рис. 2.7. Модуль Р – блок обработки сигнала фотоприемника ED-0060

Модуль Н – цифровой контроллер лазерных диодов и элементов Пельтье ED-020

Модуль Н – это полностью цифровое операционное устройство, которое управляет током инжекции, а также температурой головки диодного лазера (рис. 2.8). Все параметры могут быть установлены и отображены посредством взаимодействия с одной ручкой. Конкретный пункт меню выбирается поворотом ручки. Нажатие ручки действует как клавиша ввода. Головка диодного лазера подключается к прибору через многоконтактный разъем. Оболочка BNC обеспечивает сигнал синхронизации частоты модуляции, когда диодный лазер включается и выключается электронным способом. Устройство ED-0020 оснащено встроенным интерфейсом USB, который обеспечивает полное дистанционное управление с дополнительного компьютера или ноутбука.

Разъемы расположены на левой стороне ED-020. Прилагается простой сетевой блок питания с выходным напряжением 12 В постоянного тока. Для подключения диодного лазера требуется 7-контактный разъем, который подходит для лазерной головки DIMO мощностью 0,5 Вт со встроенным элементом Пельтье и датчиком температуры NTC. Гнездо BNC предназначено для вывода мониторингового сигнала внутреннего модулятора. Этот сигнал можно использовать как опорный. Разъем USB предназначен для управления устройством с помощью внешнего программного обеспечения. В табл. 2.1 приведены технические характеристики устройства.



Рис. 2.8. Модуль Н – цифровой контроллер лазерных диодов и элементов Пельтье ED-020

Таблица 2.1

Технические характеристики ED-020

Характеристика	Допустимые значения
Ток инжекции	Максимум 1000 мА с шагом 10 мА
Температура	15–40 °С с шагом 1 °С
Модуляция	10–1000 Гц с шагом 10 Гц
Рабочее напряжение	12 В пост. тока
Входы	Подключение диодного лазера
Выходы	Сигнал модуляции, как опорный сигнал TTL (Transistor-transistor logic) через BNC оболочку

Панель управления ED-020

При повороте центральной ручки последовательно выделяется выбранный элемент (рис/ 2.9).



Рис. 2.9. Панель управления ED-020

Чтобы включить лазер, поверните ручку, пока не будет выделено меню «Laser», как показано на рисунке слева. Кратковременное нажатие на центральную ручку (менее одной секунды) включает или выключает лазер (Laser ON/OFF). Если было установлено предыдущее значение тока и лазер выключен, процессор обеспечивает мягкое выключение лазерного диода.

Для изменения тока инжекции выберите меню «Current» и утопите центральную ручку на 2 секунды, пока пункт «Current» не начнет мигать. Поворотом ручки выбирается ток, который выставляется на лазерный диод от процессора с плавным шагом 10 мА за 100 мс. При повторном нажатии на центральную ручку происходит выход и закрытие текущего меню.

Для изменения температуры выберите меню «Temp.» и утопите центральную ручку на 2 секунды, пока надпись «Temp.» не начнет мигать. Значение температуры выбирается поворотом ручки. Для ввода значения центральная ручка должна быть нажата до тех пор, пока пункт меню «Temp.» не перестанет мигать. Температуру можно установить в диапазоне от 15 °С до 35 °С. Когда пункт меню «Temp.» выделен, отображается заданное значение температуры, когда не выделен – фактическое значение температуры. Может пройти некоторое время, прежде чем система достигнет стабильной температуры.

Ток инжекции может периодически включаться и выключаться с заданной частотой (пункт меню «Modulator»). В этом режиме также модулируется выходная мощность лазерного диода. Это представляет интерес, когда необходимо проводить измерения, зависящие от времени. Частота модуляции может быть установлена от 0 до 1000 Гц.

2.2. Подготовка волокна

Перед использованием волокна его необходимо подготовить таким образом, чтобы входная и выходная поверхности были перпендикулярны и имели наилучшее оптическое качество. Это достигается посредством скалывания волокна. Перед скалыванием необходимо удалить защитное акрилатное покрытие с помощью так называемого *стриппера Миллера* (рис. 2.10).

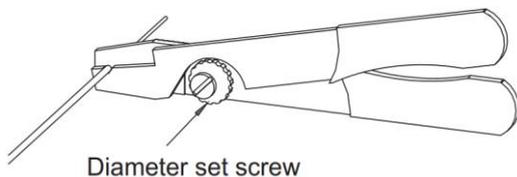


Рис. 2.10. Стриппер Миллера (модуль М)

Стриппер Миллера должен быть отрегулирован таким образом, чтобы сомкнутые клещи не царапали стекло волокна при снятии пластиковой оболочки. Это достигается регулировкой винта установки диаметра.

Подготовленное волокно укладывается в оптоволоконный скалыватель (модуль К) (рис. 2.11) и фиксируется резиновым зажимом.

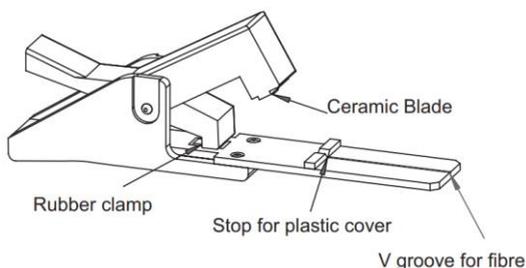


Рис. 2.11. Стриппер Миллера (модуль М)

После фиксации платформа с волокном отгибается вниз, обеспечивая натяжение волокна. Далее, коротко нажимается керамический нож, и волокно откалывается. Оставшуюся часть волокна следует собрать с помощью скотча и утилизировать из соображений безопасности.

3. Методика проведения эксперимента

3.1. Сборка и подготовка установки к измерениям

Перед тем как приступить к измерениям, следует определить оптическую ось установки. Это делается с помощью осциллографа. Ток инжекции светодиода модулируется так, чтобы на экране осциллографа были видны прямоугольные импульсы.

Коллиматор (модуль В) устанавливается для того, чтобы сформировать параллельный узкий пучок света (лазерный луч). Затем с помощью винтов тонкой настройки модуля А лазерный луч центрируется на детекторе. Центрирование луча можно проверить по максимальному сигналу на осциллографе. Отметим, что при этом необходимо работать в таком диапазоне мощностей, чтобы детектор не достиг насыщения, т. е. инжекционный ток светодиода не должен быть слишком велик.

Следующим шагом является установка соединительного оптического элемента (модуля С) – объектива, фокусирующего параллельный пучок на сердцевину оптического волокна. При этом расстояние между модулями С и В выбирается более или менее произвольно за счет параллельности лазерного пучка; рекомендуется установить примерно 50 мм. Далее держатель для волокна и регулировки его положения (модуль D, без волокна) укладывается на рельс на расстоянии около 10 мм от модуля С. Затем волокно аккуратно крепится к держателю при помощи магнитов. Лазерный диод переключается на максимальный ток инжекции с включенной внутренней модуляцией (режим внутренней модуляции «on»). Другой держатель для волокна (модуль E) устанавливается на краю рельса. Выходной конец волокна укладывается в модуль E и также прижимается магнитами. Затем точно напротив выходного конца волокна устанавливается детектор (G), который крепится к пластине держателя E. Если блок усилителя и осциллограф настроены на максимум, на выходе волокна уже может быть обнаружено модулированное лазерное излучение. Далее нужно настроить волокно для получения максимального сигнала. Для этого следует плавно поворачивать рычаг регулировочного держателя G, наблюдая за амплитудой сигнала на осциллографе. Когда амплитуда достигнет максимума, следует попробовать изменить расстояние между входным концом волокна и соединительным модулем С при помощи регулировочного винта поступательного перемещения вдоль рельса держателя волокна D. В новом положении винты точной настройки снова настраиваются на максимум сигнала. Заметим, что при сильном увеличении амплитуды сигнала, естественно, следует уменьшить усиление осциллографа. Но также следует уменьшить и ток инжекции светодиода, поскольку детектор может быть близок к состоянию насыщения.

Если лаборатория достаточно затемнена, сигнал, выходящий из оптического волокна ($\lambda \sim 805$ нм), можно наблюдать при помощи ИК-преобразователя.

Описанные выше шаги настройки повторяются до тех пор, пока наблюдается увеличение мощности. После этого установка готова для следующих измерений.

3.2. Числовая апертура волокна

Используя поворотный рычаг модуля G, можно измерить угловое распределение интенсивности излучения, выходящего из оптического волокна. При этом следует использовать модулированный свет для того, чтобы устранить влияние возмущений окружающей среды. Числовая апертура будет равна синусу максимального угла выхода излучения из волокна.

Измерив апертуру волоконного световода можно определить разность показателей преломления между сердцевинной и оболочкой, используя формулу (1). При этом показатель преломления кварцевого стекла можно считать равным $n = 1,46$.

Напомним, что показатели преломления сердцевины и оболочки отличаются на несколько тысячных долей, и оба они близки к значению 1,46, поэтому можно с уверенностью утверждать, что $n = 1,46 \pm 0,01$ (причем практически во всем видимом и ближнем ИК-диапазонах). Поэтому, принимая $n = 1,46$ при расчете Δn , мы допускаем ошибку, не превышающую 1%.

3.3. Измерение времени распространения излучения

Для измерения времени прохождения света по волокну собирается схема согласно рис. 2.1. Детектор, подключенный к блоку формирования сигнала (модуль P), следует расположить напротив выходного конца волокна (угол поворота рычага модуля G равен нулю). Рекомендуемые режимы фотоприемника ED-0060: «Выкл.», 100 кОм, 10 кОм. Модуль P подключен к первому каналу осциллографа. Второй канал подключен к выходу модуля H – блоку управления светодиодом ED-0020. Опорная кривая A на рис. 3.1 представляет собой кривую нарастания мощности сигнала, снятую непосредственно с выхода модуля H.

Теперь волокно следует удалить из установки, снимая магнитные держатели. (Внимание! Концы волокна должны находиться в безопасном месте.) Кривая B представляет собой кривую нарастания сигнала без волокна, снятую с выхода модуля P. Соответственно, Время T1 – время задержки сигнала в системе без волокна. Оно определяется по 50-процентному уровню мощности сигнала.

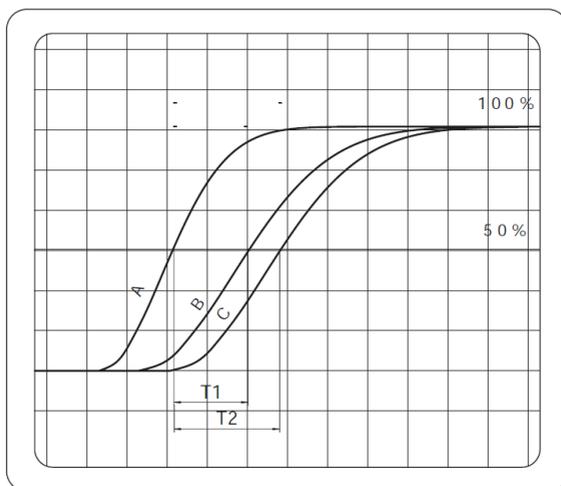


Рис. 3.1. Участок нарастания мощности сигнала на оциллограмме

Затем снова монтируется волокно, и система настраивается на максимальную мощность. В результате с выхода модуля Р измеряется кривая С и время T_2 , которое также определяется по 50-процентному уровню мощности сигнала. Время прохождения излучения по волокну:

$$\tau = T_2 - T_1.$$

Измеряя время прохождения излучения по волокну, можно оценить длину волоконного световода, принимая показатель преломления кварцевого стекла $n = 1,46 \pm 0,01$:

$$L = v\tau = \frac{c}{n} \tau.$$

Замечание. При длинах волокна порядка 1 км время задержки сигнала будет определяться главным образом временем прохождения излучения по волокну. При этом расстояние между кривыми А и В будет гораздо меньше расстояния между кривыми В и С. И в этом случае демонтировать волокно и отдельно измерять время T_1 не нужно. Время прохождения сигнала по волокну с хорошей точностью будет равно T_2 .

4. Ход работы

Задание 1. Определение длины оптоволокна

1. Собрать установку без оптического волокна согласно пункту 3.1.
2. Подключить опорный сигнал и сигнал с фотоприемника к осциллографу.
3. Перевести фотоприемник в режим «Выкл.».
4. Включить лазер в непрерывном режиме, значение тока установить равным 200 мА.
5. Добиться максимального уровня мощности сигнала фотоприемника на экране осциллографа путем настройки модулей C, D, G согласно пункту 3.1.
6. Перевести лазер в модулированный режим с частотой 10 Гц.
7. Получить осциллограммы опорного и оптического сигналов и провести настройку осциллографа.
8. Сохранить на флешку осциллограммы опорного и оптического сигналов при значениях тока накачки 200–500 мА и режимах фотоприемника «Выкл.», 100 кОм, 10 кОм.
9. Выключить лазер.
10. Добавить в схему катушку многомодового оптоволокна длиной 1100 м.
11. Повторить пункты 2–8.
12. Согласно пункту 3.3 рассчитать время прохождения излучения лазера по оптоволокну. Провести обработку результатов, оценить погрешность.
13. Повторить пункты 10–12 для катушки многомодового оптоволокна длиной 2000 м.
14. Рассчитать длину оптоволокна. Сравнить с паспортным значением.

Задание 2. Определение числовой апертуры оптоволокна

1. Собрать установку с катушкой многомодового оптоволокна длиной 1100 м.
2. Подключить опорный сигнал и сигнал с фотоприемника к осциллографу.
3. Перевести фотоприемник в режим «Выкл.».
4. Включить лазер в непрерывном режиме, значение тока установить равным 200 мА.
5. Добиться максимального уровня мощности сигнала фотоприемника на экране осциллографа путем настройки модулей C, D, G согласно пункту 3.1.

6. Получить осциллограммы опорного и оптического сигналов и провести настройку осциллографа.
7. Настроить режим измерения напряжения на осциллографе. Для этого перейти: *Cursors – ручной – привязка к сигналу*.
8. Поворачивая модуль G (по часовой стрелке и против), провести измерение напряжения каждые 30' до достижения минимального напряжения.
9. Повторить (3–5 раз) измерения согласно пункту 8.
10. Построить график зависимости напряжения от угла поворота, оценить по нему числовую апертуру и погрешность. Сравнить с паспортным значением.
11. Рассчитать разность показателей преломления сердцевины и оболочки.
12. Определить нормированную частоту (волноводный параметр), диаметр сердцевины $d = 50$ мкм.
13. Оценить межмодовую дисперсию и ширину спектра пропускания.
14. Повторить пункты 1–10 для катушки одномодового оптоволокна длиной 2000 м.

Вопросы к сдаче работы

1. При каких условиях наблюдается явление полного внутреннего отражения?
2. Объясните принцип работы и опишите конструкцию оптического волокна.
3. Дайте определение числовой апертуры. Вывести формулу для числовой апертуры в приближении геометрической оптики.
4. Что такое «мода» волоконного световода?
5. В чем различие одномодового и многомодового оптического волокна? Каковы их параметры? Для каких практических целей чаще всего используются одномодовые и многомодовые волокна?
6. Дайте определение нормированной частоте.
7. Сформулируйте условие одномодового режима распространения излучения.
8. Как определяется длина волны отсечки высших мод?
9. Что такое межмодовая дисперсия?
10. Что такое ширина спектра пропускания волоконного световода?
11. Рассчитайте максимальный угол ввода излучения в волоконный германосиликатный световод, если разность показателя преломления сердцевины и оболочки равна 0,005.

12. Волоконный лазер использует в качестве активной среды волокно с прямоугольным профилем показателя преломления с разностью показателей преломления $\Delta n = 0,01$ и имеет выходную мощность 10 Вт. Считая, что мощность равномерно распределена по сердцевине волокна, определите какая мощность может попасть в зрачок диаметром 5 мм на расстоянии 1 м.
13. Определить максимальный диаметр волоконного световода, при котором выполняется условие одномодового режима, если длина волны света $\lambda = 1,55$ мкм, предельный угол ввода излучения $\varphi_{\max} = 15^\circ$.

Список литературы

1. Янг М. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы / пер. с англ. – Москва : Мир, 2005. – 541 с.
2. Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника : учебное пособие, курс лекций. Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2008. – 143 с.
3. Зеленовский П.С. Основы интегральной и волоконной оптики : учеб. пособие / П. С. Зеленовский ; отв. ред. Я. Ю. Волкова ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Уральский федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2019. – 132 с.