

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»**

А.В. Нежданов, А.В. Ершов, А.И. Машин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК И ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НИХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета для
студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки
11.03.04 – Электроника и наноэлектроника
28.03.01 – Нанотехнологии и микросистемная техника

Нижегород

2020 г.

УДК 539.18

ББК 22.343

Н43

Н43 Нежданов А.В., Ершов А.В., Машин А.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК И ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НИХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН: Практикум. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2020. – 26 с.

Данная работа является частью лабораторного практикума по курсу “Квантовая и оптическая электроника”. В ней изложены принципы работы оптических волокон, их типы и основные характеристики. Продемонстрированы основные методы исследования профиля показателя преломления заготовок и оптических волокон из них. Практикум предназначен для студентов бакалавриата физического факультета ННГУ, обучающихся по направлениям 11.03.04 – Электроника и наноэлектроника и 28.03.01 – Нанотехнологии и микросистемная техника.

Рецензент:

с.н.с. НИФТИ ННГУ им.Н.И. Лобачевского

к.ф.-м.н. С.А. Денисов

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии ФзФ ННГУ,
к.ф.-м.н., доцент Перов А.А.

УДК 539.18

ББК 22.343

© Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Оптические волноводы.....	5
1.1. Физические принципы работы оптического волокна	5
1.2. Типы оптических волокон.....	7
1.2.1 Волокна со ступенчатым ППП	8
1.2.2 Градиентные волокна	11
2. Методы определения профиля показателя преломления заготовок и волокон	17
2.1. Лучевой метод определения профиля показателя преломления заготовок и волокон, изготовленных из них	17
2.2. Измерение профиля показателя преломления методом ближнего поля.....	18
2.3. Метод фокусировки	21
3. Описание лабораторной работы	23
3.1. Постановка задачи	23
3.2. Техника безопасности при работе с лазерами	24
3.3. Контрольные вопросы	25
3.4. Указания к оформлению отчета	25
Используемая литература.....	26

ВВЕДЕНИЕ

Практикум направлен на изучение студентами основных свойств диэлектрических оптических волноводов и экспериментальное определение профиля показателя преломления поперечного сечения оптического волокна.

Простейший оптический волновод (аксиальное оптическое волокно, ОВ) представляет собой круглый по сечению диэлектрический стержень, называемый сердечником (сердцевиной), окруженный оболочкой диэлектрика, с отличающимся от сердцевины химическим составом. Профиль показателя преломления (ППП) среза волокна, и особенно сердцевины, играет важную роль в описании всех остальных его свойств. Профиль, в частности, позволяет определить числовую апертуру волокна и количество распространяющихся внутри сердечника мод, определить интермодальную и/или профильную дисперсию. Кроме того, поскольку импульсная характеристика и, следовательно, пропускная способность волокна сильно зависят от профиля показателя преломления, то важным является, чтобы производитель волокна мог формировать конкретные профили с высокой степенью воспроизводимости, особенно в аксиальных волокнах с градиентным профилем рефракции. Это делает актуальной потребность в точном и экспрессном измерении профиля показателя преломления. Такие измерения могут быть выполнены с использованием набора методов [1], каждый из которых имеет определенные преимущества и недостатки. Ниже мы рассмотрим некоторые наиболее распространенные методы, метрологические результаты которых можно относительно легко интерпретировать теоретически.

Цель работы – теоретическое и практическое освоение методов работы с оптическими волокнами. Знакомство с основными свойствами и методами исследования профиля показателя преломления волокон и заготовок на различных длинах волн и расчетами их параметров.

1. Оптические волноводы

Рассмотрим принцип работы оптического волновода, его типы, основные параметры и их взаимосвязь.

Оптическое волокно – это цилиндрический диэлектрический волновод, изготовленный из материала с малыми потерями (кварц, стекло или полимер), предназначенный для передачи света на расстояние.

1.1. Физические принципы работы оптического волокна

В общем случае, оптическое волокно представляет собой двухслойную стеклянную нить (рис. 1). Оно имеет центральную **сердцевину** (радиус a , показатель преломления n_1), по которой распространяется свет. Сердцевина окружена **оболочкой** с радиусом b и с показателем преломления n_2 , причем $n_2 < n_1$.

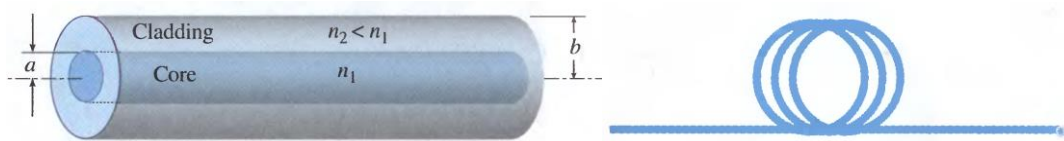


Рисунок 1. Общий вид диэлектрического волновода [2].

Показателем преломления (n) вещества называют физическую величину, представляющую собой отношение скорости света в вакууме (c) к скорости света в данном веществе (v), то есть $n=c/v$. Кроме того, показатель преломления зависит от параметров вещества, в котором свет распространяется и может быть рассчитан по формуле:

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (1)$$

где ϵ – диэлектрическая, а μ – магнитная проницаемости среды [3].

Лучи света, падающие на границу раздела между сердцевиной и оболочкой под углами больше критического, испытывают **полное внутреннее отражение** (ПВО) и распространяются по сердцевине, не уходя в оболочку. Эффект ПВО возникает на границе раздела двух сред при выполнении условия $n_1 > n_2$.

Рассмотрим простой случай, когда луч света, распространяющийся в среде с показателем преломления n_1 , встречает границу раздела со средой, имеющей меньший показатель преломления n_2 (рис. 2).

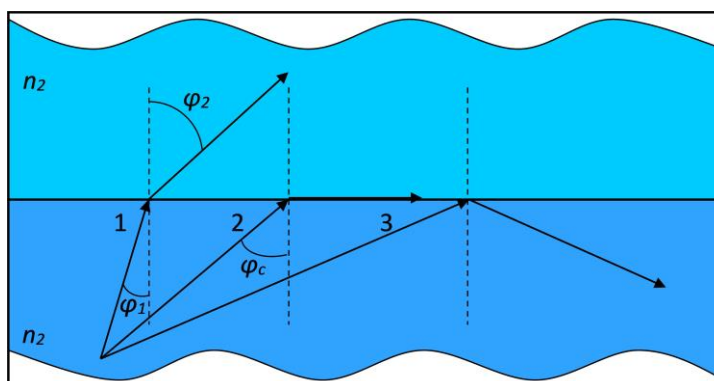


Рисунок 2. Ход лучей при падении на границу раздела при условии $n_1 > n_2$.

Для данной системы справедлив **закон Снеллиуса**

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2)$$

и угол падающего на границу раздела луча ϕ_1 (луч 1) будет меньше, чем угол преломленного луча ϕ_2 в среде с меньшим показателем преломления. При возрастании ϕ_1 возрастает и ϕ_2 , и поскольку ϕ_2 больше ϕ_1 , ϕ_2 , в данном случае станет равным 90° раньше, чем угол ϕ_1 . Для случая луча 2, угол ϕ_1 , когда преломленный луч скользит по границе раздела (то есть, для которого $\phi_2 = 90^\circ$), называют **критическим углом ϕ_c** или **углом полного внутреннего отражения**. Угол полного внутреннего отражения рассчитывается по формуле (2) полагая, что $\phi_2 = 90^\circ$:

$$\sin \phi_c = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3)$$

Когда угол падения становится больше ϕ_c (луч 3), луч не заходит во вторую среду, а полностью отражается обратно в первую среду. Именно этот принцип полного внутреннего отражения позволяет оптическим волокнам передавать свет на большие расстояния без существенных потерь.

1.2. Типы оптических волокон

Свет в сердцевине волокна распространяется в виде **мод**. Каждая мода распространяется вдоль оси волновода с определенной **постоянной распространения** и **групповой скоростью**, сохраняя при этом **поперечное распределение поля** и **поляризацию**. В диэлектрическом волноводе каждая мода может быть представлена суммой многократно отражающихся волн внутри сердцевины с определенным углом наклона лучей к оси волновода.

Если диаметр сердцевины мал, то поддерживается лишь одна мода, и волокно называется **одномодовым** (рис. 3).

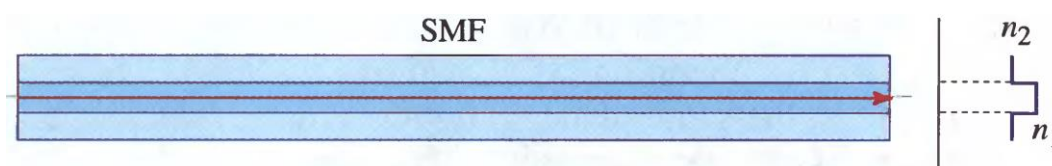


Рисунок 3. Геометрия, профиль показателя преломления и типичный ход лучей в одномодовом волокне [2].

Волокна с большим диаметром сердцевины являются **многомодовыми** (рис. 4). Одна из основных трудностей передачи оптического сигнала по многомодовым волокнам связана с тем, что групповые скорости мод различны. Это приводит к разбросу времен прохождения, и в качестве результата мы можем наблюдать уширение импульса по мере его прохождения через оптоволокно. Этот эффект, называемый **модовой дисперсией**, ограничивает частоту следования входных импульсов: интервал между запускаемыми импульсами должен быть достаточно большим, чтобы они не пересекались на дальнем (выходном) конце волокна.

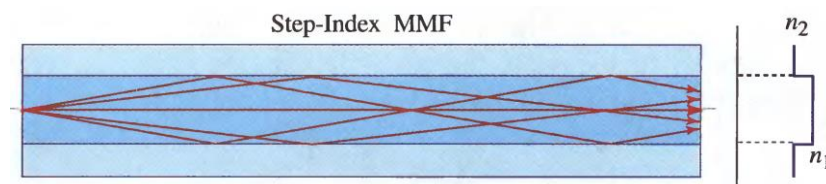


Рисунок 4. Геометрия, профиль показателя преломления и типичный ход лучей в многомодовом волокне со ступенчатым ППП [2].

Модовую дисперсию можно уменьшить за счет плавного уменьшения показателя преломления сердцевины от максимального значения, в центре, до

минимального – на границе между сердцевиной и оболочкой (рис. 5). В этом случае волокно называется **градиентным (GRIN)** [4], тогда как обычное волокно называется **волокном со ступенчатым показателем преломления**.

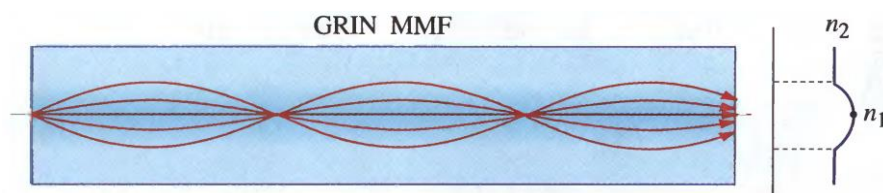


Рисунок 5. Геометрия, профиль показателя преломления и типичный ход лучей в градиентном многомодовом волокне [2].

Рассмотрим лучевое описание волокон со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления.

1.2.1 Волокна со ступенчатым ППП

Свойства диэлектрического волновода со ступенчатым профилем показателя преломления определяются показателями преломления n_1 , n_2 и радиусами a , b сердцевины и оболочки соответственно (рис. 3). Стандартные отношения диаметров сердцевины и оболочки (мкм/мкм) являются [4]: $2a/2b = 8/125$; $50/125$; $62,5/125$ и $100/140$. Показатель преломления сердцевины и оболочки слабо отличаются, поэтому их **относительная разность** мала:

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \approx (n_1 - n_2) / n_1 \ll 1. \quad (4)$$

Большинство волокон, используемых в современных оптических системах связи, изготавливаются из плавленого кварца высокой степени химической чистоты. Для изменения показателя преломления используют низкие концентрации легирующих веществ, таких как титан, германий и бор. В результате чего получают изменения показателя преломления от 1,44 до 1,46, а Δ в типичных случаях лежит между 0,001 и 0,02.

Луч света в волокне со ступенчатым показателем преломления направляется посредством полного внутреннего отражения внутри сердцевины, если угол падения луча на границу между сердцевиной и оболочкой больше критического угла и остается таковым при многократном

отражении. Направляемые лучи могут быть **центральными, меридиональными** и **косыми** [4].

Меридиональными называются лучи, лежащие в плоскости, проходящей через ось волокна (рис. 6). Эти лучи пересекают ось волокна и отражаются в одной плоскости без изменения угла падения. Меридиональные лучи не выходят из сердцевинки при условии, что угол θ , образуемый им с осью волокна, меньше угла, дополнительного к критическому, т.е. если

$$\theta < \bar{\theta}_{\text{кр}} = \frac{\pi}{2} - \theta_{\text{кр}} = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right). \quad (5)$$

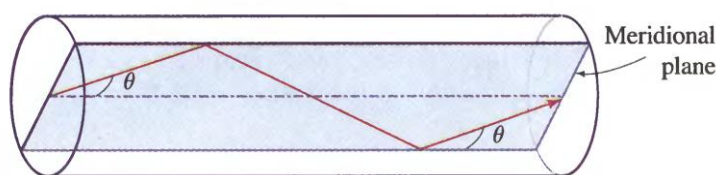


Рисунок 6. Траектория меридионального луча лежит в плоскости, проходящей через ось волокна. Луч направляется волноводом, если выполняется условие (5) [2].

Поскольку $n_1 \approx n_2$, синус $\theta_{\text{кр}}$ обычно мал, и направляемые лучи приблизительно параксиальны [4].

Произвольный луч характеризуется плоскостью, в которой он находится и которая параллельна оси волокна, а также углом отклонения от направления оси в этой плоскости (рис. 7). Эта плоскость пересекает границу раздела между сердцевинкой и оболочкой, образуя угол φ с нормалью к ней. Расстояние от оси до указанной плоскости обозначим через R . Таким образом, луч задается углом отклонения от направления оси θ и углом наклона его плоскости φ . Когда $\varphi \neq 0$ ($R \neq 0$) луч называется косым. Для меридиональных лучей $\varphi = 0$ и $R = 0$.

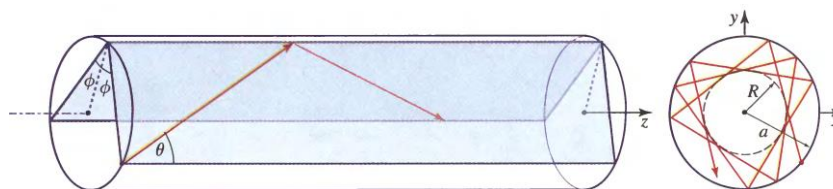


Рисунок 7. Траектория косого луча [2].

Проекция траектории на поперечную плоскость x - y представляет собой правильный многоугольник, не обязательно замкнутый. Условие полного

внутреннего отражения косого луча заключается в том, что угол его отклонения θ от направления оси z должен быть меньше угла, дополнительного к критическому.

Луч, падающий из воздуха на торец волокна, становится направляемым лучом, если после преломления на торце сердцевинки он образует с осью волокна угол θ , который меньше $\theta_{кр}$. Как следует из рисунка 6, если применить к границе между воздухом и сердцевинкой закон Снеллиуса, то угол θ_a в воздухе, соответствующий углу $\theta_{кр}$ в сердцевинке, получается из условия $1 \cdot \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_{кр}$, которое приводит к

$$\sin \theta_a = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \bar{\theta}_{кр}} = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (6)$$

Угол приема (входная угловая апертура) волокна равен:

$$\theta_a = \arcsin NA, \quad (7)$$

где NA – числовая апертура волокна:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (8)$$

Входная угловая апертура определяет конус падающих лучей, которые могут направляться волокном [4]. Лучи, падающие под большими углами, проникают в волокно, но проходят вдоль него лишь небольшое расстояние, поскольку для них внутренне отражение не является полным. Таким образом, числовая апертура описывает способность волокна собирать свет, что показано на рисунке 8.

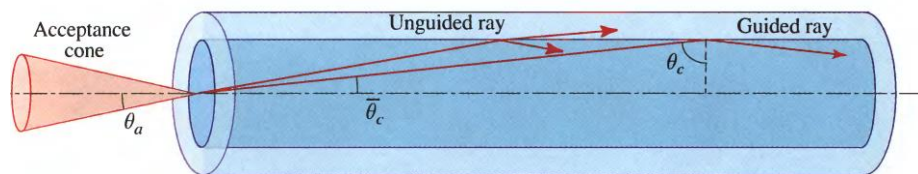


Рисунок 8. Угол приема (входная угловая апертура) волокна [2].

Когда направляемые лучи достигают выходного торца волокна, они преломляются и выходят снова внутри конуса с углом θ_a . Таким образом, входная угловая апертура волокна представляет собой ключевой параметр для ввода-вывода излучения.

1.2.2 Градиентные волокна

Решением проблемы расплывания импульса из-за разницы в групповых скоростях мод в многомодовом волокне может быть создание плавного профиля показателя преломления. Сердцевина градиентного волокна имеет плавно меняющийся показатель преломления, который максимален в центре и уменьшается по направлению к оболочке, достигая наименьшего значения на границе. Поэтому фазовая скорость света минимальна в центре волокна и постепенно растет по направлению к границе раздела сердцевина – оболочка. Как следствие, разброс времени прохождения между разными составляющими импульса уменьшается.

Рассмотрим распространение света в градиентном волокне. Показатель преломления сердцевины градиентного волокна $n(r)$ является функцией радиальной координаты r . На рисунке 9 показано, что наибольшее значение $n(r)$ достигается на оси волокна, $n(0) = n_1$, а наименьшее – на расстоянии, равном радиусу сердцевины, $n(a) = n_2$. Показатель преломления оболочки постоянен и равен n_2 .

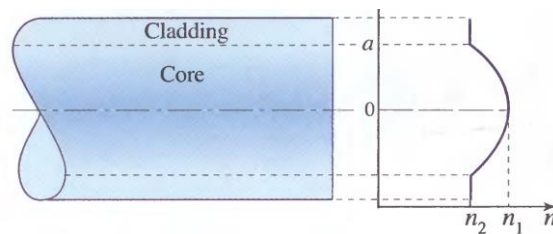


Рисунок 9. Геометрия и профиль показателя преломления градиентного оптического волокна [2].

Изменяемый профиль показателя преломления, обладающий этими основными свойствами, можно описать степенным законом:

$$n^2(r) = n_1^2 \left[1 - 2 \left(\frac{r}{a} \right)^p \Delta \right], r \leq a, \quad (9)$$

где относительная разность показателя преломления равна:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (10)$$

Профильный параметр p определяет степень крутизны профиля. Как показано на рисунке 10 он является линейной функцией при $p = 1$ и

квадратичной при $p = 2$. В пределе, при $p \rightarrow \infty$ профиль становится ступенчатым. Таким образом, волокно со ступенчатым профилем показателя преломления является частным случаем градиентного волокна.

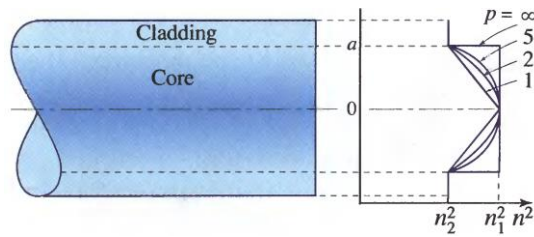


Рисунок 10. Степенной профиль показателя преломления $n^2(r)$ для разных значений p [2].

В меридиональной плоскости лучи (рис. 11 (а)), входящие в волновод по центру под углом к его оси, отклоняются из-за профиля показателя преломления от его оси, загибаются на некотором характеристическом расстоянии и затем, двигаясь вперед, вновь пересекают ось. Их траектория напоминает синусоидальную линию. Таким образом, луч движется по большему пути, чем центральный, но часть своего пути он проходит в материале с меньшим показателем преломления (в «быстром материале») [4],

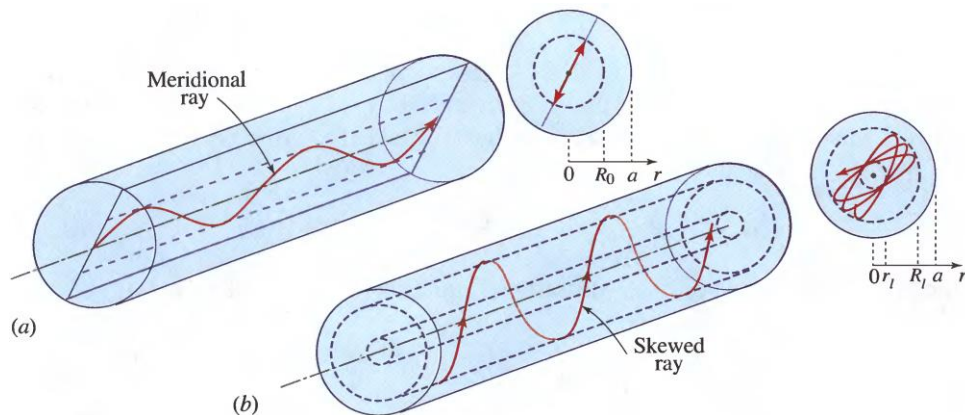


Рисунок 11. Направляемы лучи в сердцевине градиентного волокна [3].

Косые лучи (рис. 11 (b)) возникают, когда свет падает под некоторым косым углом к цилиндрической поверхности постоянного радиуса в точке с некоторыми промежуточными значениями n и r . Опять-таки длина пути этого луча больше, чем для центрального, но весь путь проходит в материале с меньшим n и, следовательно, в более "быстром материале".

Числовую апертуру градиентного оптоволокна можно найти, определив наибольший угол наклона падающего луча, при котором он останется в пределах сердцевины и не достигнет оболочки. Для меридиональных лучей в градиентном волокне с параболическим профилем числовая апертура дается выражением (8).

В градиентных световодах при относительно толстой сердцевине распространяется много мод, а их дисперсия остается малой. Они обладают высокой пропускной способностью. Многомодовое волокно со ступенчатым профилем n может обеспечить скорость передачи информации до 10 . . . 20 Мбит/с в линии длиной 8 . . . 10 км. Градиентное волокно позволяет передачу информацию со скоростью 140 Мбит/с на то же расстояние [5].

Для точного описания распространения света в оптическом волокне необходимо перейти к электромагнитной теории. Рассматривая электрическое и магнитное поле направляемых волн, исходя из уравнений Максвелла и граничных условий для цилиндрической диэлектрической сердцевины и оболочки, можно найти решения этой задачи, называемые **модами**, и каждое из них будет иметь определенную постоянную распространения, характеристическое распределение поля по поперечному сечению и два независимых поляризационных состояния. Точное решение представляет значительные трудности, и обычно исходят из ряда приближений. Приведем лишь итоговые выводы из таких расчетов.

Так, в результате вводится **волноводный параметр (нормированная частота)**, определяемый формулой:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA, \quad (11)$$

где λ – длина волны. Это один из важнейших обобщающих параметров, используемых для оценки свойств ОВ, который связывает его структурные параметры и длину световой волны, распространяемой в волокне.

Если $0 < V < 2,405$, то режим работы волокна одномодовый, если $V > 2,405$ – многомодовый. Чем меньше диаметр сердцевины ОВ, тем меньше мод

может в ней распространяться и тем меньшее уширение получают оптические импульсы. Соответственно, увеличивается коэффициент широкополосности ОВ, и одномодовое оптическое волокно (ООВ) может передавать более широкие по полосе сигналы, чем многомодовое (МОВ).

Общее **число мод** в многомодовом оптическом волокне с диаметром сердцевины $2a$, с заданной числовой апертурой на рабочей длине волны λ определяется через нормированную частоту выражением вида:

$$M \approx \begin{cases} \frac{v^2}{2} & \text{— для ОВ со ступенчатым ППП} \\ \frac{v^2}{4} & \text{— для ОВ с градиентным ППП} \end{cases} . \quad (12)$$

В расчетах M может оказаться дробным числом, в то время как число мод в волокне бывает только целым и составляет от одной, до тысячи мод. В волокне с градиентным ППП и тем же диаметром сердцевины, показателями преломления n_1 , и n_2 , число мод, примерно, в 2 раза меньше, чем в ОВ со ступенчатым ППП. Количество мод (с учетом всех вырожденных мод) в случае ступенчатого ППП определяется выражением вида:

$$M = \frac{v^2}{2(1+2/p)} \quad (13)$$

где p — показатель степени, описывающий изменения ППП.

Каждый тип волны (мода) имеют свою **критическую частоту** и **длину волны**. Наличие критической частоты в волоконных световодах объясняется тем, что при очень высоких частотах почти вся энергия концентрируется внутри сердечника световода, а с уменьшением частоты происходит перераспределение поля, и энергия переходит в окружающее пространство. При определенной частоте $f_{кр}$ - критической или частоте отсечки, поле больше не распространяется вдоль световода, и вся энергия рассеивается в окружающем пространстве.

Частота, при которой поле не распространяется вдоль световода, а вся энергия рассеивается в окружающее пространство, называется критической частотой.

Критическая частота $f_{кр}$:

$$f_{кр} = \frac{v_1}{\lambda_o} = \frac{v_1 P_{nm}}{2\pi R \sqrt{1 - \frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}}} = \frac{P_{nm}}{2\pi R \sqrt{\mu_1 \varepsilon_1 - \mu_2 \varepsilon_2} \sqrt{\mu_o \varepsilon_o}} = \frac{P_{nm}}{2\pi R \sqrt{\mu_{a1} \varepsilon_{a1} - \mu_{a2} \varepsilon_{a2}}} =$$

$$= \frac{c P_{nm}}{2\pi R \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \quad (14)$$

где P_{nm} – корни функций Бесселя;

$v_1 = 1/\sqrt{\mu_{a1}\mu_{a2}}$ - скорость распространения энергии в сердцевине волновода.

Минимальная длина волны, при которой ОВ поддерживает только одну распространяемую моду, называется длиной волны отсечки (*критической длиной волны*).

Критическая длина волны $\lambda_{кр}$:

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi R}{P_{nm}} \cos \varphi = \frac{2\pi R}{P_{nm}} \sqrt{1 - \sin^2 \varphi} = \frac{2\pi R}{P_{nm}} \sqrt{1 - \frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}} = \frac{2\pi R \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{P_{nm} n_1}. \quad (15)$$

С ростом частоты появляются волны других типов, например E_{01} и H_{01} . При $P_{nm} = 2,405$ критическая частота передачи определяется по формуле:

$$f_{кр} = \frac{2,405}{2\pi R \sqrt{(\varepsilon_1 \mu_1 - \varepsilon_2 \mu_2) \varepsilon_o \mu_o}}. \quad (16)$$

Диаметр сердечника волновода для одномодовой передачи определяется:

$$d_1 = 2R = \frac{\lambda_{кр} P_{nm}}{\pi \sqrt{1 - \mu_2 \varepsilon_2 / \mu_1 \varepsilon_1}}. \quad (17)$$

Обычно $\mu_1 = \mu_2 = 1$, тогда

$$f_{кр} = \frac{P_{nm}}{2\pi R \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \mu_o \varepsilon_o}}. \quad (18)$$

Большой интерес представляет зависимость **затухания** от длины волны (рис. 12).

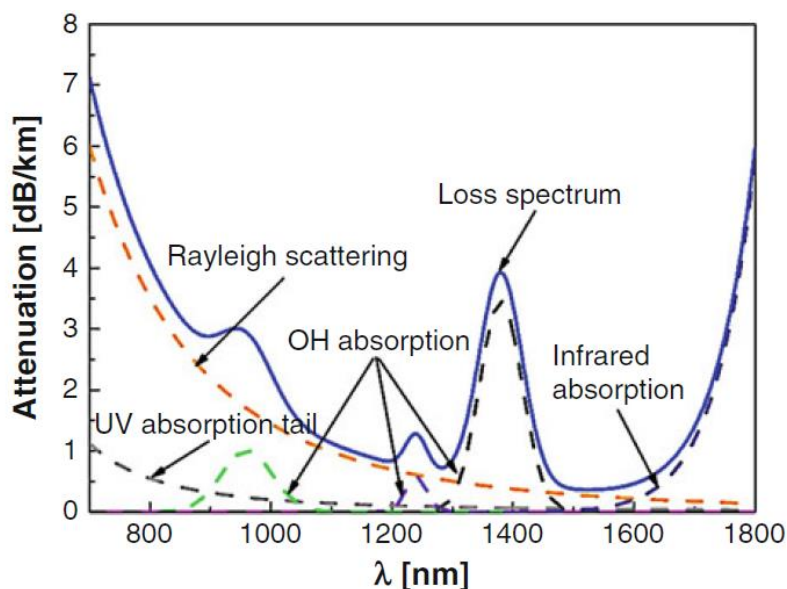


Рисунок 12. Зависимость затухания от длины волны [1].

В целом затухание с увеличением длины волны уменьшается. Однако, на отдельных длинах волн (0,95; 1,25 и 1,39 мкм) возникают всплески затухания, которые обусловлены резонансными явлениями в гидроксильных группах ОН. На длине волны более 1,6 мкм затухание возрастает за счет потерь на поглощение в инфракрасной области спектра. Между пиками затухания находятся три области с минимальными оптическими потерями, которые получили название **окон прозрачности**. С увеличением номера окна затухание уменьшается. Так, первое окно прозрачности наблюдается на длине волны 0,85 мкм, на которой величина затухания составляет 2-4 дБ/км. Второе окно прозрачности соответствует длине волны 1,3 мкм, на которой затухание составляет 1,0-1,5 дБ/км. Третье окно прозрачности наблюдается на длине волны 1,55 мкм, на которой затухание составляет 0,5-0,2 дБ/км. Целесообразно, чтобы оптические системы передачи по волоконным световодам работали именно на указанных длинах волн, которые получили название **рабочих**. В настоящее время наибольший интерес вызывают два последних окна прозрачности, которые обеспечивают наименьшее затухание и максимальную пропускную способность волоконных световодов.

2. Методы определения профиля показателя преломления заготовок и волокон

2.1. Лучевой метод определения профиля показателя преломления заготовок и волокон, изготовленных из них

Для определения профиля n этим методом на заготовку перпендикулярно к ее оси направляют лазерный пучок, как показано на рис. 13а, и измеряют угол выхода пучка $\psi(y)$ как функцию расстояния y падающего пучка от оси x [6].

Профиль $n(r)$ заготовки может быть получен из функции отклонения пучка $\psi(y)$ вычислением численным методом интеграла вида:

$$h(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \Psi \left\{ \cos h \frac{x}{n(b)\sqrt{t}} \right\} dx. \quad (19)$$

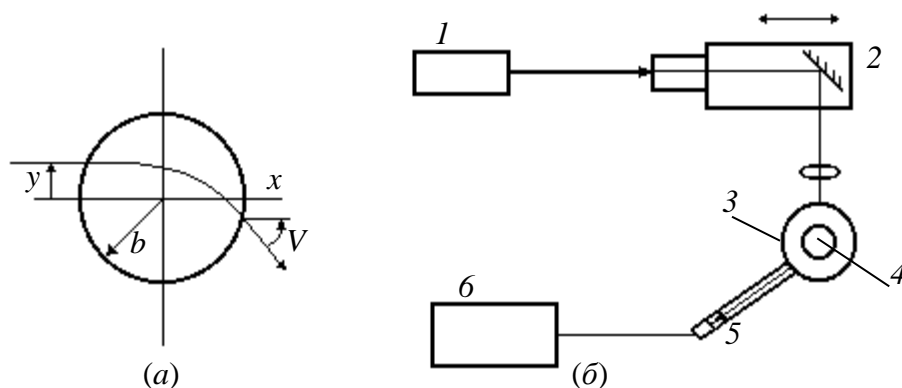


Рисунок 13. Геометрия в лучевом методе (а); установка, реализующая лучевой метод измерения профиля показателя преломления заготовок (б). 1 – He–Ne лазер; 2 – зеркало для перемещения луча; 3 – поворотный столик и плечо; 4 – заготовка или волокно; 5 – фотодиод; 6 – селективный усилитель.

$$r(t) = \frac{1}{n(b)\sqrt{t}} \cdot e^{h(t)}, \quad (20)$$

где t – параметр, который изменяется от $\{b \cdot n(b)\}^{-2}$ до 0; b – радиус волокна или заготовки. Аргумент функции отклонения $\psi \cos h \left\{ \frac{x}{n(b)} \cdot \sqrt{t} \right\}$. После нахождения $h(t)$ определяют показатель преломления по формуле:

$$n\{r(t)\} = n(b)e^{-h(t)}. \quad (21)$$

Соотношение (19) непосредственно применимо к заготовкам с плавным изменением показателя преломления между волокном (заготовкой) и окружающей средой. Чтобы не пользоваться иммерсионной жидкостью, разность показателей преломления заготовки и окружающей среды учитывается соответствующим преобразованием координат луча.

Схема практической реализации данного метода показана на рисунке 13б. Свет He-Ne-лазера отклоняется зеркалом и фокусируется линзой в узкий луч, падающий на заготовку. Зеркало и линза располагаются на столике, который перемещается шаговым двигателем (или вручную). Фотодетектор смонтирован на поворотном плече. При каждом положении падающего луча фотодетектором отыскивается выходящий луч и измеряется распределение его интенсивности в функции от угла детектора. Максимум интенсивности соответствует углу отклонения луча, значение которого записывают вместе с координатой падающего луча. По завершению процесса сканирования профиль показателя преломления рассчитывается на ЭВМ. Точность измерения h в этом методе ограничена толщиной луча света, проходящего через заготовку.

2.2. Измерение профиля показателя преломления методом ближнего поля

Схема измерения профиля показателя преломления $n(r)$ методом ближнего поля показана на рисунке 14.

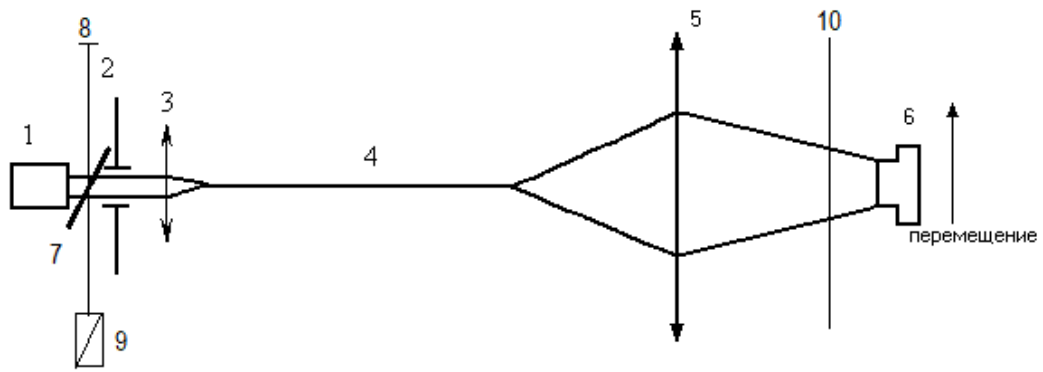


Рисунок 14. Схема измерения профиля показателя преломления: 1 - лазер, 2 - диафрагма, 3 – проекционная линза, 4 - оптическое волокно, 5 - проекционная линза, 6 – фото или телекамера, 7 – полупрозрачное зеркало, 8 – матовое стекло, 9 – окуляр микроскопа.

На входном торце отрезка волокна 4, длиной $\geq 1\text{м}$, при помощи микрообъектива 3 формируется изображение источника. На плоскости 10 с помощью объектива 5 формируется относительно большее изображение выходного торца оптического волокна 4. В оригинальном методе вместо фотокамеры используется перемещаемый вдоль диаметра изображения малый фотоприемник. В результате снимают профиль распределения интенсивности излучения на выходном торце волокна. Для повышения точности измерения предусматривается ограничение исходного пучка света диафрагмой 2 и увеличение разрешения ПЗС-матрицы фотокамеры 6.

Порядок совмещения изображения источника света 1 и сердцевины волокна 4: при выключенном источнике света 1 выходной торец волокна 4 освещается светом от лампы накаливания; полупрозрачное зеркало 7 и окуляр микроскопа 9 устанавливают так, чтобы в окуляре 9 видно было четкое светящееся пятно, соответствующее входному торцу оптоволокна (рис. 15а). Затем включают источник 1. Перемещая источник 1 и входной торец волокна 4, в окуляре также видно красное пятно - отраженный луч лазера 1 от входного торца (рис. 15б). Продолжая юстировку, добиваются совмещения центров пятен, как показано на рисунке 15в.

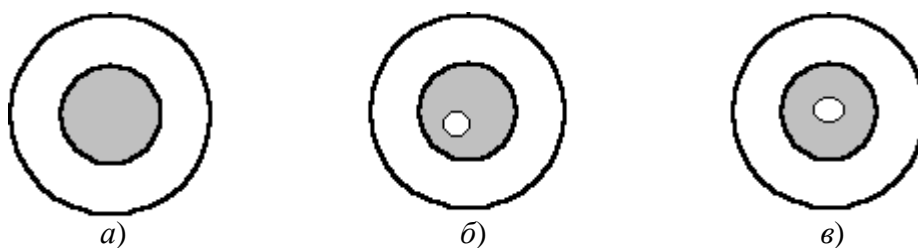


Рисунок 15. Порядок совмещения источника света и сердцевины волокна.

Чтобы упростить процедуру измерения и увеличить наглядность можно заменить фотокамеру передающей телевизионной камерой и анализировать видеосигнал.

Зная профиль мощности излучения $P(r)$ можно рассчитать профиль показателя преломления, используя выражение:

$$P(r) = P(0) \frac{n^2(r) - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2}. \quad (22)$$

Выражение (22) не учитывает моды утечки из-за малой длины волокна. Поэтому в измерениях профиля показателя преломления $n(r)$ оптического волокна методом ближнего поля необходимо как можно больше ослаблять влияние мод утечки путем точного согласования числовой апертуры источника с апертурой волокна.

Измерение апертуры с достаточной точностью оптического волокна можно провести на этой же установке по схеме, показанной на рисунке 16. Для этого на расстоянии L от выходного торца волокна строго перпендикулярно оси волокна устанавливается отражающий экран 5. Если видимый на экране диаметр светового пятна обозначить D , то апертурный угол φ определяется выражением

$$\varphi = \text{arctg}[D/2L]. \quad (23)$$

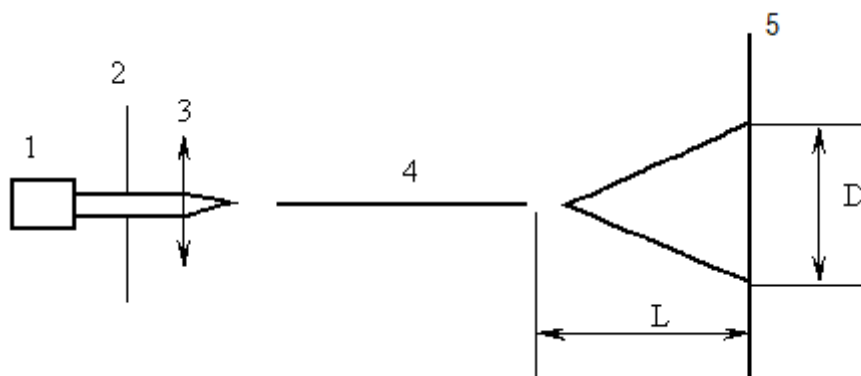


Рисунок 16. Измерение апертуры оптического волокна (обозначения, как и на рисунке 14).

2.3. Метод фокусировки

Данный метод обеспечивает высокую точность при измерении профиля показателя преломления заготовок и световодов как многомодовых, так и одномодовых.

При измерении методом фокусировки (рис. 17) образец освещается в поперечном направлении некогерентным светом, пропущенным через светофильтр. Волокно, рассматриваемое под микроскопом, и заготовка, для получения изображения которой достаточно короткофокусной линзы, помещаются в иммерсионную жидкость для устранения влияния внешней границы оболочки.

Сердцевина, будучи цилиндрической линзой, фокусирует свет, распределение плотности потока которого в плоскости изображения определяют с помощью видеокамеры. Плоскость изображения определяется плоскостью, на которую сфокусирована видеокамера. Эту плоскость не следует выбирать внутри сердцевины волокна, а также удалять настолько, что лучи, покинувшие сердцевину, пересекутся.

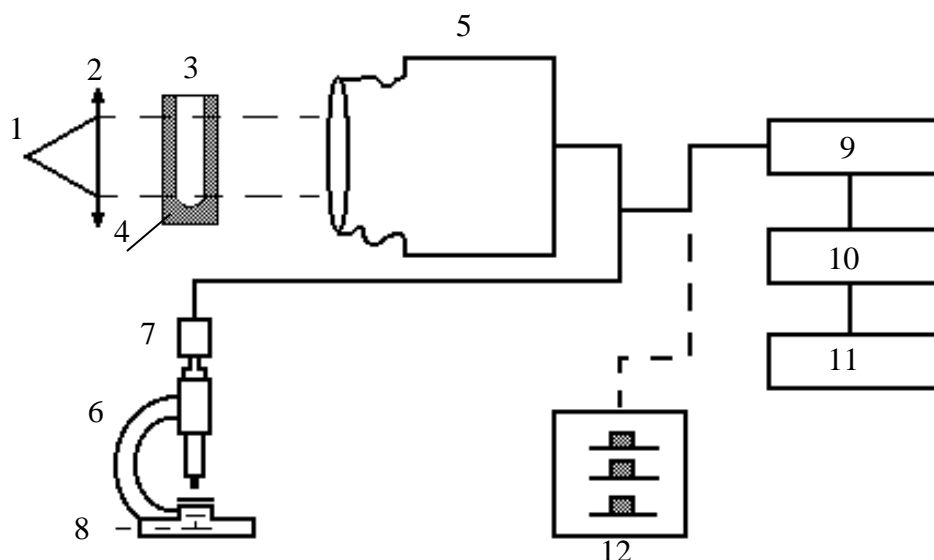


Рисунок 17. Установка для измерения профиля показателя преломления заготовок и волокон: 1 - источник света; 2- линза; 3 -заготовка; 4 - иммерсионная жидкость; 5 - телевизионная камера; 6- микроскоп; 7 - видео камера; 8 - световой пучок; 9 - цифровой преобразователь; 10 – компьютер; 11 - графопостроитель; 12 - экран монитора.

Хорошие результаты можно получить, если плоскость изображения располагается непосредственно за сердцевинной.

Изображение многомодовой заготовки 3, полученное с помощью видеокамеры 5, показано на мониторе 12. Средняя черная горизонтальная полоса соответствует центральному провалу показателя преломления, который как сильная отрицательная линза рассеивает свет и создает минимум плотности светового потока в плоскости изображения. Интенсивность света преобразуется в цифровую форму и передается в ЭВМ для расчета распределения показателя преломления.

3. Описание лабораторной работы

Данный практикум имеет целью практическое освоение методов исследования профиля показателя преломления оптических волокон и их основных параметров. На рисунке 18 представлена принципиальная схема измерения, построенная на базе монохроматора МДР-204 (4).

По указанию преподавателя студенту предлагается экспериментально исследовать профиль показателя преломления двух оптически волокон. Определить тип ОВ, измерить числовую апертуру (NA) и количество распространяющихся мод в зависимости от длины волны.

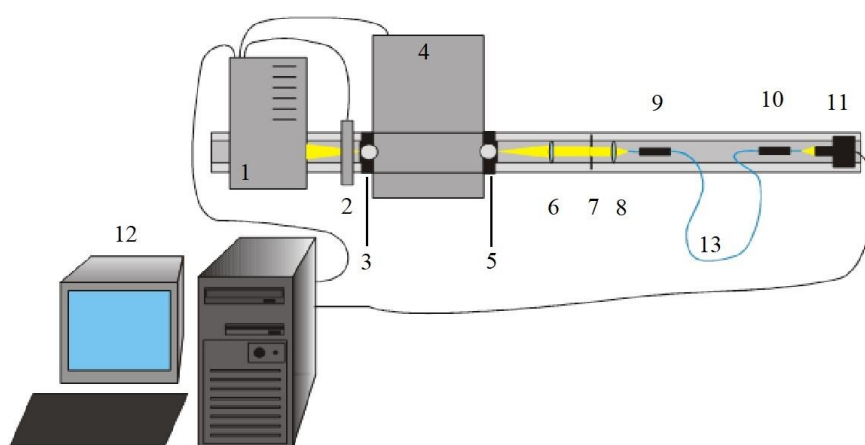


Рисунок 18. Принципиальная схема установки по исследованию профиля показателя преломления оптических волокон (1 – источник света с защитным кожухом; 2 – модулятор; 3 – входная щель; 4 – монохроматор МДР-204; 5 – выходная щель; 6 – линза; 7 – диафрагма; 8 – микрообъектив; 9, 10 – держатель оптического волокна; 11 – ПЗС матрица с микрообъективом; 12 – компьютер, 13 – оптическое волокно).

3.1. Постановка задачи

1. Совместно с лаборантом собрать схему измерения (рис. 14) профиля показателя преломления $n(r)$ методом ближнего поля (раздел 2.2), смонтированную на оптическом столе фирмы Standa, для изоляции ее от внешних вибраций.
2. По схеме, показанной в разделе 2.2 на рисунке 16 определить числовую апертуру оптических волокон на трёх длинах волн, выбранных преподавателем.

3. Измерить распределение мощности излучения на выходном торце оптических волокон с помощью ПЗС матрицы с микрообъективом в зависимости от типа волокна и длины волны вводимого излучения.
4. По полученным результатам рассчитать профили показателя преломления и определить тип исследуемых оптических волокон.
5. Рассчитать количество мод в зависимости от длины волны для многомодового световода.

Для выполнения заданий 4, 5 использовать параметры световодов, полученные при выполнении заданий 2 и 3. Недостающие параметры сообщит лаборант.

3.2. Техника безопасности при работе с лазерами

Техника безопасности по работе с оптическими квантовыми генераторами изложена в инструкции с регистрационным № 226 (ННГУ). Основные моменты инструкции изложены ниже.

1. Не разрешается стоять на пути пучка лазера. Для предотвращения поражения прямым или зеркально отраженным лучом лазера запрещается вносить в зону луча блестящие предметы и производить визуальное наблюдения прямого излучения. Не смотреть на те места, куда попадает излучение лазера, во избежание попадания рассеянного излучения в глаза.
2. Не оставлять лазер включенным без присмотра даже на непродолжительное время.
3. Лазер должен устанавливаться так, чтобы путь пучка проходил по наименее посещаемой зоне. В случае, когда излучение лазера не поглощается на измерительном приборе, в конце пучка устанавливается экран (или ловушка) для ограничения распространения пучка. Экран (или ловушка) должны быть выполнены так, чтобы рассеяние пучка от них было сведено к минимуму.

4. При подозрении на возможное повреждение глаз сотрудника, подвергшегося действию луча лазера, пострадавшего следует немедленно отправить к врачу для осмотра и оказания первой помощи.

3.3. Контрольные вопросы

1. Описать принцип действия волоконных световодов.
2. Основные типы волоконных световодов: одномодовый световод; многомодовый градиентный световод; многомодовый световод со ступенчатым профилем показателя преломления.
3. Дать определение критической частоты и длины волны волоконного световода. Понятие числовой апертуры.
4. Какие типы волн (мод) возможны в световоде?
5. Методы измерения профиля показателя преломления заготовок и волокон.

3.4. Указания к оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен носить аналитический характер и состоять из двух частей. Первая часть должна отражать краткие теоретические основы, позволившие получить и произвести анализ экспериментальных результатов, необходимые для проведения эксперимента оценки.

Вторая часть содержит описание результатов по экспериментальному получению образца, по измерениям его макроскопических свойств согласно заданию. Приводятся результаты анализа, оценки, обоснования и объяснения возможных отклонений от ожидаемых результатов. Студент так же должен дать рекомендации по улучшению проведения процесса напыления.

Используемая литература

- 1 Ding M., Fan D., Wang W., Luo Y., Peng GD. Basics of Optical Fiber Measurements. In: Peng GD. (eds) Handbook of Optical Fibers / Springer, Singapore, 2018. – 39 p.
- 2 Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of Photonics, 2nd Edition / Wiley. 2007. – 947 p.
- 3 Бутиков, Е. И. Оптика: Учебное пособие / Е.И. Бутиков. - СПб.: Лань, 2012. - 608 с.
- 4 Салех, Б. Оптика и фотоника. Принципы и применение. Пер. с англ.: Учебное пособие. В 2 т. Т. 1 / Б. Салех, М. Тейх. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. – 760 с.
- 5 Быстров, Ю.А. Оптоэлектронные приборы и устройства: Учебное пособие / Ю.А. Быстров. - Москва: РадиоСофт, 2001. - 256 с.
- 6 Chu P.L. Nondestructive measurement of index profile of an optical-fibre preform // Electron. Lett. 1977. Т. 13. № 24. С. 736.
- 7 Адамс, М. Введение в теорию оптических волноводов / М. Адамс. - Москва: Мир, 1964. - 512 с.
- 8 Унгер, Х.Г. Планарные и волоконные оптические волноводы/ Х.Г. Унгер. - Москва: Мир, 1980. - 656 с.
- 9 Мидвинтер, Дж. З. Волоконные световоды для передачи информации / Дж.З. Мидвинтер. - Москва: Радио и связь, 1983. - 336 с.
- 10 Козанне, А. Оптика и связь / А. Козанне. - Москва: Мир, 1984. - 502 с.
- 11 Гончаренко, А.М. Введение в интегральную оптику / А.М. Гончаренко, Б. П. Редько - Минск: Наука и техника. 1975. - 350 с.