

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

ИЗМЕРЕНИЕ АПЕРТУРЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Методические указания к лабораторной работе

Направление подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Магистерская программа «Оптические системы связи и обработки информации»

Томск 2018

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

Утверждаю

Зав. каф. СВЧ и КР

_____ С.Н. Шарангович

ИЗМЕРЕНИЕ АПЕРТУРЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Методические указания к лабораторной работе

Направление подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи». Магистерская программа «Оптические системы связи и обработки информации»

Разработчики:

проф. каф. СВЧ и КР

_____ А.Е. Мандель

доц. каф. СВЧ и КР

_____ А.С. Перин

Томск 2018

ИЗМЕРЕНИЕ АПЕРТУРЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Цель работы: ознакомление с апертурными свойствами оптических волокон, являющимися одной из основных характеристик ОВ, ответственных за эффективность ввода сигналов.

1. Введение

Апертурным углом оптического волокна называется угол между оптической осью волокна и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волокна, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения лучей на границе раздела «сердцевина-оболочка». Лучи, находящиеся внутри указанного конуса, представляют совокупность мод, направляемых волокном.

2. Апертурный угол и числовая апертура оптического волокна

Апертурным углом многомодового оптического волокна называется угол между оптической осью волокна и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волокна, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения лучей на границе раздела «сердцевина-оболочка». Лучи, находящиеся внутри указанного конуса, представляют совокупность мод, направляемых волокном. Синус апертурного угла есть числовая апертура волокна. При определении числовой апертуры в качестве внешней среды берется воздух, который имеет коэффициент преломления $n_0 = 1$. В этих условиях величина апертурного угла и апертуры зависят от значений коэффициентов преломления сердцевины волокна n_1 и оболочка волокна n_2 .

На рис. 2.1 показана модель распространения лучей на границе раздела двух сред с коэффициентами преломления n_1 и n_2 , причем $n_1 > n_2$.

Падающий луч, который имеет угол падения φ_1 , в общем случае испытывает отражение под углом φ_1 и преломления под углом φ_2 . При этом:

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.1)$$

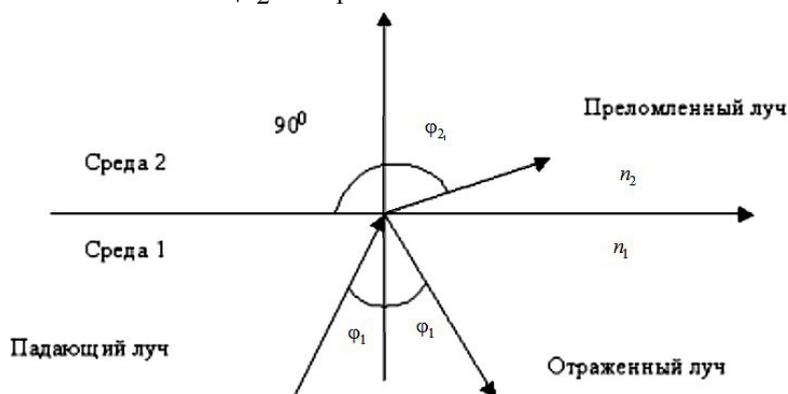


Рисунок 2.1 – Лучевая картина границе раздела оптических сред

Положив $\varphi_2=90^0$, имеем $\sin \varphi_2=1$, т.е. преломленный луч направлен вдоль границы раздела. Кроме того, его энергия имеет нулевое значение. Обозначив в данном случае $\varphi_2=\varphi^*$, из (2.1) получаем:

$$\sin \varphi^* = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.2)$$

При угле падения φ^* луч в среде 2 не поступает и весь отражается в среду 1, т.е. происходит полное внутреннее отражение оптической энергии. Угол полного внутреннего отражения, определенный по (2.2), представляет собой критическую величину угла падения. Все лучи, которые имеют $\varphi^* < \varphi_1 < 90^0$, также испытывают полное внутреннее отражение на границе раздела сердцевинки и оболочки.

В соответствии с изложенным, апертурный угол ступенчатого волокна связан с углом φ^* , имеющим место на границе раздела сердцевинки и оболочки.

Лучевая модель условий ввода оптической энергии в волокно представлена на рис. 2.2, где из всей совокупности лучей точечного источника, расположенного на оси волокна, выделены траектории трех лучей.

Луч 1 имеет угол падения φ^* , поэтому при достижении границы раздела, часть его энергии выходит в оболочку и излучается из волокна. Таким же образом происходит и дальнейшее отражение этого луча. В результате переносимая им энергия на коротком расстоянии от начала волокна полностью высвечивается и следовательно, не участвует в процессе распространения сигналов по волокну.

Луч 2 (и симметричный ему луч 2*) падает на границу раздела с углом, равным φ^* и следовательно, испытывает полное внутреннее отражение. Таким образом, энергия, переносимая этим лучом, полностью удерживается в сердцевинке и сигнал передается по волокну. В аналогичных условиях находятся все лучи, имеющие угол падения больше φ^* , в том числе луч 3 (и симметричный ему луч 3*). Отсюда следует, что все лучи, находящиеся внутри кругового конуса в пределах θ_a , распространяется по ОВ, т.е. θ_a является его апертурным углом.

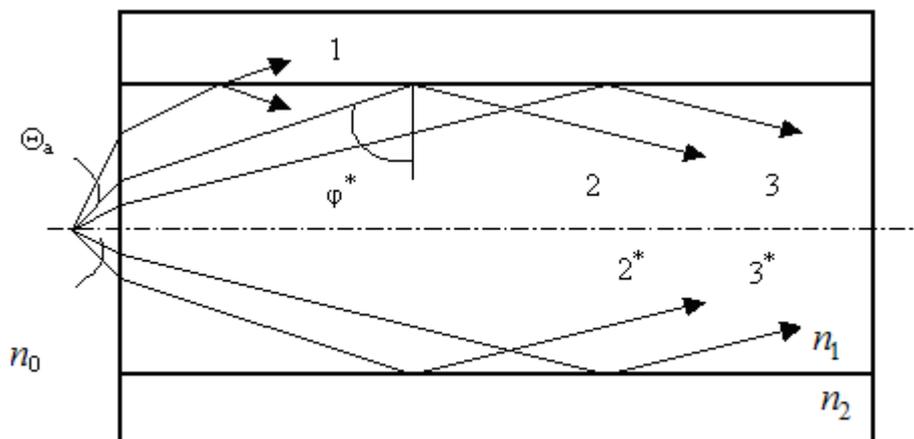


Рисунок 2.2 – Лучевая картина ввода в ступенчатое волокно

С использованием (2.1), (2.2) и геометрических соотношений рис 2.2, имеем:

$$\sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.3)$$

Так как $n_1 - n_2 = \Delta n \ll n_1$, то $\theta_a < 1$ и величина апертурного угла:

$$\theta_a \cong \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.4)$$

Согласно (2.3), числовая апертура оптического волокна:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2.5)$$

Преобразуя (5), получаем:

$$NA = \sqrt{(n_1 + n_2) * (n_1 - n_2)} \approx \Delta n \sqrt{2 n_1}, \quad (2.6)$$

В кварцевых волокнах $n_1, n_2 = 1,45 \div 1,50$, поэтому можно записать:

$$NA \approx 1,7 * \Delta n, \quad (2.7)$$

где – абсолютная величина разности коэффициентов преломления сердцевины и оболочки волокна.

Таким образом, если известна величина апертуры, то можно легко рассчитать значение Δn и обратно.

В градиентных волокнах апертурные свойства несколько сложнее. При смещении точечного источника с оси волокна величина апертурного угла изменяется, однако в целом оказывается возможным применять определенные выше апертурные характеристики, используя в качестве величины n_1 значение коэффициента преломления на оси волокна.

Как видно из (2.4) – (2.7), числовая апертура и апертурный угол волокна тем больше, чем большую величину имеет разность коэффициентов преломления Δn . Для примера, взяв $\Delta n = 0,01$, с помощью (2.7) получаем $NA = 0,17$. Волокна, имеющие апертуру более 0,2, называются высокоапертурными волокнами. Поскольку NA однозначно связано с Δn , то величина числовой апертуры волокна характеризует ряд его важных передаточных параметров, зависящих от разности коэффициентов преломления.

Чем больше числовая апертура, тем больше уширение импульсов из-за

модовой дисперсии:

$$\Delta \tau_{\text{м}} = \frac{\Delta n}{C}, \text{с/км}, \quad (2.8)$$

большее величина обобщенного параметра волокна:

$$V = \frac{2 \chi_{\text{п}} \chi_{\text{а}}}{\lambda} \chi_{\text{НА}}, \quad (2.9)$$

большее количество направляемых волн:

$$N = \begin{cases} \frac{M}{\pi} V^2 / 2, & \text{для ступенчатого волокна} \\ \frac{N}{\pi} V^2 / 4, & \text{для градиентного волокна} \end{cases}, \quad (2.10)$$

меньше потери на изгибах:

$$\Delta a_{\text{из}} = \frac{d_c \chi_{n_1}}{0,23 \chi_{R_{\text{из}}} \chi_{\Delta n}}, \text{дБ} \quad (2.11)$$

С ростом апертуры уменьшаются потери энергии на вводе в волокно при использовании источников с широкой диаграммой направленности излучения.

В выражениях (2.8) – (2.11) использованы величины: $C=3 \cdot 10^5 \text{км/с}$, a – радиус сердцевины в мкм, d_c и $R_{\text{из}}$ – диаметр сердцевины и радиус изгиба волокна (берутся в одной и той же размерности, например, в мм).

Как следует из изложенного, высокоапертурные волокна обеспечивают сравнительно низкие потери на вводе с сравнительно мало чувствительны к изгибам. Однако они имеют сравнительно низкую пропускную способность за счет большой модовой дисперсии. Поэтому высокоапертурные волокна применяются для передачи оптических сигналов на короткие расстояния, в пределах помещения или объекта. В оптических кабелях, предназначенных для применения на сетях связи, используются низкоапертурные волокна.

В данной лабораторной работе используется принцип измерения числовой апертуры оптического волокна в дальней зоне, используя наиболее простой способ – косвенный: по результатам измерения апертурного угла. Апертурный угол ОВ можно измерять путем наблюдения распределения выходной мощности в дальней зоне. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис.2.3.

Числовую апертуру измеряют по схеме, представленной на рис. 2.3. В нее входит некогерентный осветитель в виде мощной лампы накаливания, с которого через объектив подается излучение на ОВ. С выхода ОВ поток света

падает на экран матового стекла, на который нанесены масштабные метки.

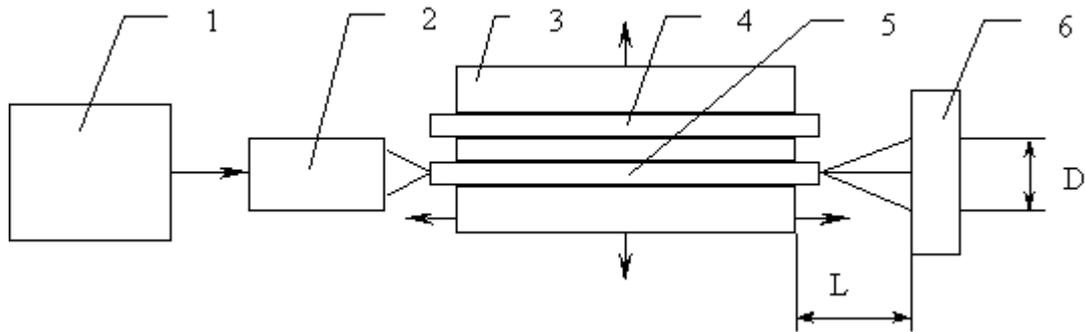


Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки

На рис. 2.3: 1 – источник питания оптической системы; 2 – оптическая система; 3 – подвижный стол; 4 – ОВ 2; 5 – ОВ 1; 6 – матовое стекло.

При определении апертуры измеряют диаметр светового пятна на экране D , после чего, вычисляют:

$$NA = \sin \theta_a, \quad (2.12)$$

$$\theta_a = \arctg \frac{D}{2L}. \quad (2.13)$$

Рассмотрим принцип измерения числовой апертуры оптического волокна, обратившись к рис. 2.3.

Оптическая система 2 состоит из лампы накаливания и линзы, формирующей световой пучок. Напряжение питания лампы накаливания подается со стабилизированного источника питания 1. Сформированный световой пучок подает на торец волокна 4, закрепленного на подвижном столе 3, с помощью которого можно менять оптические волокна, а также, фокусировать световой пучок на торец ОВ. Далее, световое излучение проходит по ОВ, и на выходе образует так называемый «конус рассеивания», который попадает на матовое стекло 5. На матовом стекле отображается световое пятно, диаметр (D) которого измеряют при помощи измерительной сетки, нанесенной на стекло. Подставляя в (2.12) и (2.13) измеренное значение диаметра (D) и известное расстояние (L), рассчитывается числовая апертура волокна.

Для точного измерения числовой апертуры ОВ используется фотодиод. При этом схема экспериментальной установки будет иметь вид, представленный на рис. 2.4.

Рассмотрим принцип измерения числовой апертуры оптического волокна, с помощью фотодиода, обратившись к рис. 2.4. В данном случае стойка с матовым стеклом заменяется на стойку с фотодиодом.

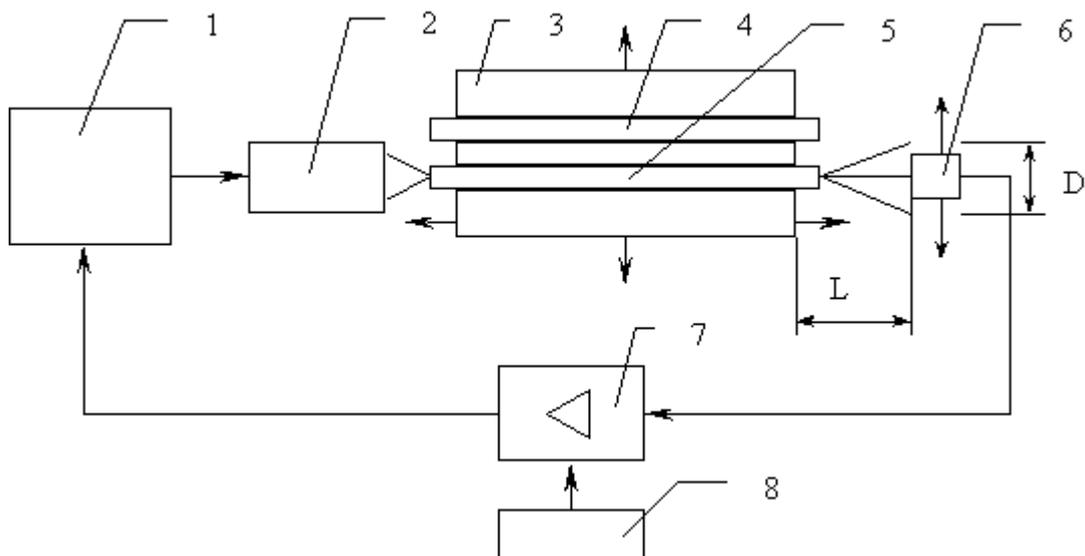


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки для точечного измерения NA

На рис. 2.4: 1 – источник питания оптической системы; 2 – оптическая система; 3 – подвижный стол; 4 – ОВ 2; 5 – ОВ 1; 6 – матовое стекло; 7 – усилитель; 8 – источник питания усилителя.

Сигнал с фотодиода 5 поступает на усилитель 6, питающийся от источника 7 двуполярного напряжения 15 В. Далее, усиленный сигнал поступает на стрелочный индикатор, установленный в корпусе источника питания 1, регистрирующий границы пятна при сканировании фотодиодом по диаметру пятна. Измерение диаметра пятна производится по уровню половинной мощности освещенности. Перемещение фотодиода производится при помощи микрометрического винта с ценой деления 10 мкм. Разность между показаниями микрометрического винта является измеренным диаметром светового пятна (D). Измеренное значение (D) и известное (L) подставляют в (2.12) и (2.13) и определяют числовую апертуру волокна.

Обработку экспериментальных данных проводят следующим образом:

Объектом обработки являются значения числовой апертуры, которые составляют ряд значений: X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 .

Выборочное среднее:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i, \quad (2.14)$$

где $n=5$ – число измерений, X_i – значение числовой апертуры.

Несмещенная оценка выборочной дисперсии:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (2.15)$$

Доверительный интервал:

$$\bar{X} - \frac{t_p \cdot S}{\sqrt{n-1}} < \mu < \bar{X} + \frac{t_p \cdot S}{\sqrt{n-1}}, \quad (2.16)$$

где t_p – критерий Стьюдента.

В данном случае, при числе экспериментов $n=5$, $t_p=2,78$.

Погрешность измерений:

$$\sigma = \frac{t_p \cdot S}{\sqrt{n-1}} \cdot 100\%, \quad (2.17)$$

3. Порядок выполнения работы

1) Ознакомится с понятиями об апертурном угле и числовой апертуре оптического волокна.

2) Собрать установку для измерения числовой апертуры по схеме, приведенной на рис. 2.3. Включить источник питания оптической системы.

3) Установить ОВ1 и поместить торец ОВ в фокус оптической системы и на экране матового стекла добиться получения светового пятна с четко различаемыми границами.

4) Собрать установку для измерения числовой апертуры по схеме, приведенной на рис. 2.4.

5) Включить источник питания усилителя. Тумблер «12В/Измерение» блока питания 1 установить в положение «Измерение».

6) С помощью микрометрического винта перемещать фотодиод вдоль диаметра светового пятна. Добиться максимального значения на индикаторе (прибор 1).

7) Измерить границы светового пятна по уровню половинной освещенности (то есть по половине максимального показания индикатора). Записать показания микрометрического винта.

8) Вычислить разность показаний микрометрического винта (D). Измерить расстояние между торцом ОВ и фотодиодом (L).

9) Вычислить числовую апертуру ОВ по (2.12) и (2.13).

10) Вычислить числовую апертуру ОВ по (2.12) и (2.13).

11) Данные, полученные в результате эксперимента, занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты эксперимента

Номер опыта		1	2	3	4	5
ОВ №1	L, мм					
	D, мм					
	NA					
ОВ	L, мм					

№2	D, мм					
	NA					

12) Провести обработку экспериментальных данных в соответствии с (2.14) – (2.17).

13) Построить зависимость диаметра светового пятна от расстояния между торцом ОВ и фотодиодом.

4. Контрольные вопросы

1) Угол полного внутреннего отражения и его связь с процессами распространения электромагнитных колебаний по оптическим волокнам.

2) Ступенчатые и градиентные оптические волокна.

3) Пояснение понятия апертурного угла и числовой апертуры с использованием лучевой модели распространения по оптическому волокну.

4) Высокоапертурные и низкоапертурные волокна. Связь значения числовой апертуры с основными параметрами оптического волокна.

5) Методика измерений и расчетов апертуры, проводимых в лабораторной работе.

Список использованных источников

1) Ефанов, В. И. Электрические и волоконно-оптические линии связи: Учебное пособие [Электронный ресурс] / В. И. Ефанов. — Томск: ТУСУР, 2012. — 150 с. — Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/802>

2) Портнов Э.Л. Оптические кабели связи и пассивные компоненты волоконно-оптических линий связи: учеб. пособие для вузов. – М: Горячая линия – Телеком, 2007. – 464 с.: ил.