

## Лабораторная работа № 5

### Определение потерь в соединениях волоконно-оптических линий связи

*Цель работы* – ознакомление с методикой соединения волоконных световодов, определение ослабления оптического сигнала на стыке двух волокон, обусловленного пространственным рассогласованием волоконных световодов.

Оптические линии связи состоят из источников и приемников излучения, волоконных световодов, ретрансляторов и т.д., которые необходимо соединять между собой. В местах соединений сигнал ослабляется. Поскольку число соединений в системе очень велико, необходимо, чтобы такое ослабление было как можно меньшим.

В принципе, соединение оптических волокон осуществить просто: достаточно совместить оси двух соединяемых волокон и торец одной сердцевины совместить с торцом другой. На практике же возникает множество трудностей. Малые размеры волокна в поперечнике (менее 500 мкм) требуют миниатюрных механических приспособлений (оптических разъемов) для удержания соединяемых волокон и специального набора инструментов для монтажа. Чтобы обеспечить минимальное ослабление сигнала в соединении, нужно выдерживать жесткие допуски на положение соединяемых элементов.

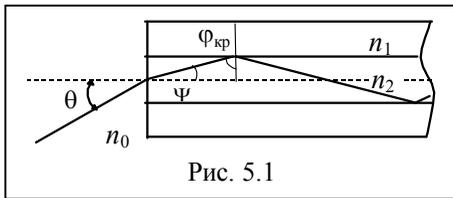


Рис. 5.1

Для того, чтобы световод удерживал свет на границе сердцевина-оболочка должно происходить полное отражение. В волокнах со ступенчатым профилем показателя преломления (рис. 5.1)

это имеет место, если угол отражения на границе сердцевина-оболочка больше критического угла  $\varphi_{кр}$ :

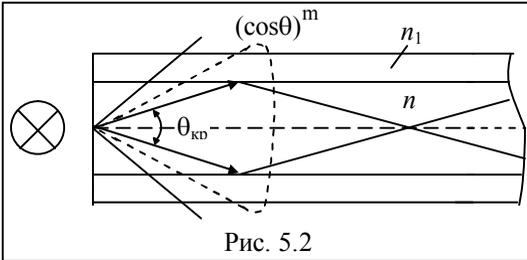
$$\sin \varphi_{кр} = \frac{n_1}{n_2}$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления оболочки и сердцевины, соответственно. Из закона преломления Снеллиуса следуют равенства

$$n_0 \sin \theta_{кр} = n_2 \sin \psi = n_2 \sin(90 - \varphi_{кр}) = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad (1)$$

где  $n_0$  – показатель преломления внешней среды,  $\theta_{кр}$  – критический угол падения,  $\psi$  – угол скольжения. Величина  $n_0 \sin \theta_{кр}$  называется числовой апертурой  $NA$  волокна. Если внешняя среда – воздух, то  $NA = \sin \theta_{кр}$ , а при

малых значениях угла падения  $NA \approx \theta_{кр}$ . Количество введенной в световод энергии зависит от многих его параметров, но, прежде всего, от значения числовой апертуры волокна  $NA$ . При сопряжении источника излучения со световодом захватываются и канализируются в сердцевине только те лучи, которые заключены внутри конуса с максимальным углом  $\theta_{кр}$ . Если угол при вершине конуса излучения источника превышает  $\theta_{кр}$ , то обязательно будут иметь место потери на ввод. В качестве иллюстрации на рис. 5.2 показана схематическая диаграмма сопряжения источника с волокном. На нем показано угловое распределение силы света источника, пропорциональной  $(\cos\theta)^m$ , где  $m$  - целое число.



Эффективность ввода излучения из источника в световод определяет коэффициент пропускания этого соединения  $\tau$ , равный отношению мощности излучения, введенной в световод ( $P_c$ ), к мощности, излучаемой источником ( $P_{и}$ ).

Оценим его для случая, когда источник оптического излучения расположен вплотную к волокну. Пусть площадь поперечного сечения диаграммы направленности излучения в плоскости входного торца волокна меньше или равна площади волокна. В расчетах не будем учитывать вытекающие моды, которые испытывают только частичное отражение на границе сердцевины с оболочкой.

Мощность, введенная в световод равна

$$P_c = 2\pi A_u K_y \int_0^{\theta_{NA}} B(\theta) \sin \theta d\theta, \quad (2)$$

где  $A_u$  - площадь излучающей поверхности источника,  $K_y$  - коэффициент упаковки волокон ( $K_y \leq 1$ ;  $K_y = 1$  при соединении с единичным волокном),  $B(\theta)$  - яркость источника,  $\theta_{NA}$  - апертурный угол, равный  $\theta_{кр}$  в случае ступенчатого световода. Если источник по своим оптическим свойствам близок к равномерному, то угловое распределение его яркости может быть описано зависимостью  $B(\theta) = B_0(\cos\theta)^m$ . Тогда из выражения (2) получим

$$P_c = 2\pi A_u K_y B_0 \left[ \frac{1 - (\cos \theta_{NA})^{m+1}}{m+1} \right]. \quad (3)$$

Аналогичный расчет позволяет найти полную мощность, излучаемую таким источником в полусфере

$$P_u = \frac{2\pi A_u B}{m+1}. \quad (4)$$

Объединяя равенства (3) и (4), получим соотношение

$$P_c = P_u K_y \left[ 1 - (\cos \theta_{NA})^{m+1} \right]. \quad (5)$$

Если числовая апертура световода  $NA$  мала, из (5) следует равенство

$$\tau = K_y \frac{(m+1)}{2} (NA)^2, \quad (6)$$

которое означает, что *эффективность ввода света в волокно пропорциональна квадрату его числовой апертуры*.

Для реальных волокон  $NA = 0,14 \div 0,5$ , поэтому, как следует из формулы (6), значительное количество излучаемой источником мощности теряется во входном соединении. Эти потери могут быть уменьшены применением линзовой системы, которая конструируется и устанавливается между источником и волокном таким образом, чтобы угол излучения источника

$\theta_i$  был не больше апертурного угла световода  $\theta_{NA}$ .

Потери излучения возникают также в результате механического рассогласования источника и световода. При этом величина зазора и угловое рассогласование слабо влияют на эффективность ввода, тогда как

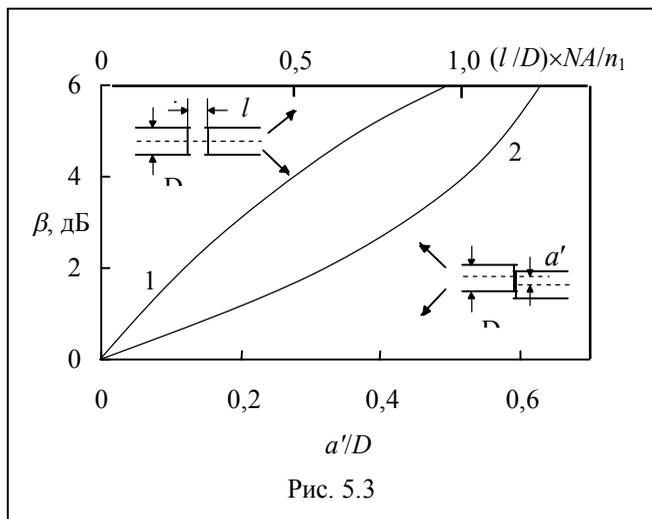
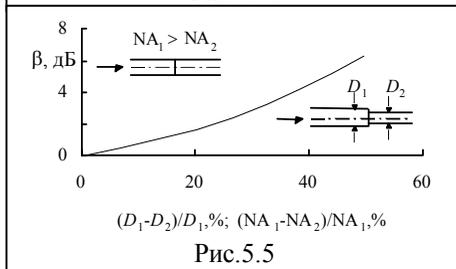
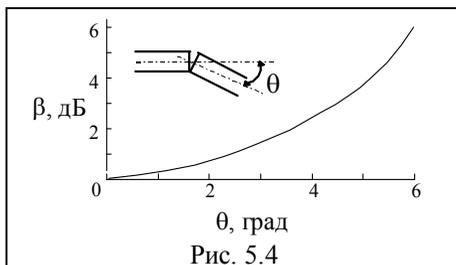


Рис. 5.3

боковое смещение (вследствие малой площади сечения сердцевины волоконного световода) может влиять существенно. Например, при вводе излучения в волокно удаление торца от светоизлучающего диода на 50 мкм приводит к потерям около 4 дБ, в то время как боковое (радиальное) смещение на 50 мкм может привести к потерям на ввод более 8 дБ.

Рассмотрим влияние механического рассогласования на потери в соединениях волоконных световодов (ВС) с безупречным состоянием торцевых поверхностей и строго перпендикулярными срезами волокон по отношению их оси. В этом случае потери излучения зависят от величины зазора между ВС, их радиального смещения (несовпадения осей) и углового рассогласования (угла наклона между осями соединяемых волокон). В качестве иллюстрации на рис. 5.3 – 5.5 [5] представлены зависимости коэффициента ослабления  $\beta$  в оптическом соединении при различных видах рассогласований. На рис. 5.3 изображена зависимость коэффициента ослабления соединения от зазора между соединяемыми волокнами и их несоосности, на рис. 5.4 – от угла наклона между соединяемыми волокнами, на рис. 5.5 – от рассогласования числовых апертур и диаметров. Чтобы получить представление о порядках величин допустимых отклонений при соединении световодов рассмотрим два одинаковых ВС с числовой апертурой 0,2 и диаметром сердцевин 50 мкм. Тогда коэффициент ослабления в соединении не будут превышать 1 дБ, если зазор между торцами менее 11 мкм, радиальное смещение менее 3 мкм, угловое рассогласование менее  $2,2^\circ$ .



Если волокна отличаются диаметром сердцевин и числовой апертурой, то в первом приближении коэффициент ослабления при их соединении пропорционален отношению площадей сердцевин или отношению квадратов числовых апертур. Так, например, если рассмотренное выше волокно соединяется с волокном меньшего диаметра, то коэффициент ослабления менее 1 дБ достигается, если диаметр второго волокна больше 45 мкм.

Когда ВС отличаются по форме поперечного сечения и по размерам, их нельзя соединять непосредственно друг с другом торцевыми сочленениями. В этом случае необходимы переходы, позволяющие согласовать распределения полей соединяемых световодов.

Распределение поля основной моды в поперечном сечении многих оптических волноводов близко к тому, которое имеет гауссов пучок. Поэтому часто для согласования полей различных ВС необходимо лишь поместить

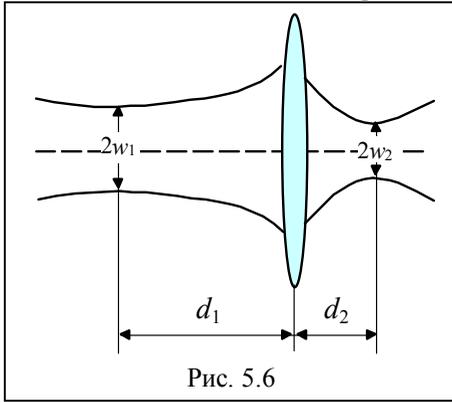


Рис. 5.6

линзу с соответствующим фокусным расстоянием  $f$  на определенных расстояниях от плоскостей перетяжки падающего и прошедшего пучков.

На рис. 5.6 показано устройство такого линзового преобразователя, расположенного между двумя различными гауссовыми пучками. Если минимальные радиусы пятен пучков равны, соответственно,  $w_1$  и  $w_2$ , то линза с фокусным расстоянием

$$f > f_o = \frac{\pi w_1 w_2}{\lambda} \quad (7)$$

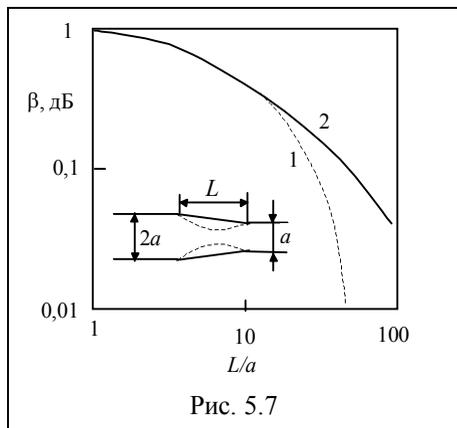
будет преобразовывать поле одного пучка в поле другого пучка, когда сечения с минимальными размерами пучков расположены от центральной плоскости согласующей линзы на расстояниях

$$d_1 = f \pm \frac{w_1}{w_2} \sqrt{f^2 - f_o^2}, \quad (8)$$

$$d_2 = f \pm \frac{w_2}{w_1} \sqrt{f^2 - f_o^2}. \quad (9)$$

Линза с минимальным фокусным расстоянием  $f_o$  должна помещаться точно в середине между минимальными сечениями обоих пучков.

Для уменьшения потерь при стыковке двух волокон применяют переходы, плавно изменяющие свои форму и размеры. Такие длинные и плавные переходы почти не имеют потерь на излучение и преобразование мод. В качестве иллюстрации на рис. 5.7 [17] показаны профили и коэффициенты ослабления, обусловленные излучением из экспоненциального (1) и линейного (2) переходов между одномодовыми волокнами с диаметрами сердцевин  $2a = 0,8\lambda$  и  $a = 0,4\lambda$  (показатели преломления обеих сердцевин  $n_1 = 1,43$ , оболочек  $n_2 = 1$ ). Потери на излучение равные 1,2 дБ при скачкообразном переходе, чрезвычайно быстро уменьшаются, если длина перехода  $L > 10a$ .

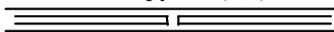


Излучение возникает главным образом на концах перехода, где в нашем примере контур профиля перехода имеет конечный наклон и поэтому при соединении с регулярным волокном образует излом. Конец перехода с меньшим размером излучает больше другого конца потому, что поле основной моды проникает глубже в оболочку и волокно направляет его здесь менее эффективно. Экспоненциальный переход соединяется на этом конце с регулярным

волокном с меньшим изломом профиля. Поэтому его потери на излучение при увеличении длины уменьшаются гораздо быстрее, чем в случае линейного перехода.

Соединения волоконных световодов друг с другом для линий, передающих информацию с большой скоростью, должны иметь малый коэффициент ослабления, как правило, меньший 0,6 дБ, и обладать достаточной механической прочностью, чтобы соединение не являлось слабым звеном в линии. Для соединения ВС друг с другом могут использоваться соединительные устройства различного типа (в скобках указаны ожидаемые потери в дБ).

– термически сжимаемая трубка (0,6):

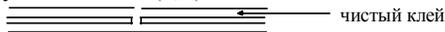


– подложка с канавкой и прижимной крышкой (0,5);

– прецизионный стержень с трубкой, дающий усадку при нагревании (0,5);

– V - канавка с прижимной крышкой (0,5);

– стеклянная втулка с клеем (0,4):



Изготовление волоконно-оптических элементов типа согласующих устройств связано с соответствующей обработкой торцов волоконных световодов. Эта обработка включает в себя, в частности, следующие процессы и операции:

- удаление защитных оболочек и покрытий с волоконных световодов;
- обламывание торцов световодов;
- шлифование и полирование торцов волокон.

Обычно конструкция оптического волокна включает в себя помимо

сердцевины и оболочки еще и механически прочное покрытие, чаще всего полимерное. Для исследования ослабления сигнала при соединении торцов световодов, полимерная оболочка удаляется с волокна вблизи его концов одним из следующих способов:

- обжигание в открытом пламени и последующая протирка тампоном, смоченным в спирте или ацетоне;
- обжигание лазерным излучением, поглощаемым веществом оболочки;
- механическая чистка.

### Методика выполнения работы

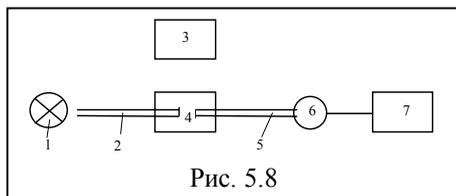


Рис. 5.8

Для измерения коэффициента ослабления в составной волоконной линии используется лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 5.8. Она включает в себя оптический микроскоп с увеличением в 50 раз, содержащий окуляр со шкалой (3), цифровой вольтметр В7-21 (7), фотоприемник типа фотодиода ФД-11К (6), волоконные световоды (2) и (5), расположенные на трехкоординатном юстировочном устройстве (4) и полупроводниковый лазер ИЛПН-301 (1) с длиной волны 0,85 мкм.

Для измерения коэффициента ослабления в составной волоконной линии используется лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 5.8. Она включает в себя оптический микроскоп с увеличением в 50 раз, содержащий окуляр со шкалой (3), цифровой вольтметр В7-21 (7), фотоприемник типа фотодиода ФД-11К (6), волоконные световоды (2) и (5), расположенные на трехкоординатном юстировочном устройстве (4) и полупроводниковый лазер ИЛПН-301 (1) с длиной волны 0,85 мкм.

### Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя волокна в оболочке и удалить защитную оболочку на концах на 1 – 2 см.
2. Проверить качество очистки с помощью микроскопа.
3. Произвести скалывание торцов волокон.
4. Проверить качество поверхности торца с помощью микроскопа и в случае необходимости произвести повторное скалывание торцов.
5. Поместить фотоприемник 6 вплотную к источнику и измерить мощность излучения источника  $P_{и}$ .
6. Закрепить волокно 2 в трехкоординатном юстировочном устройстве. Поместить фотоприемник 6 после первого волокна 2 вплотную к нему и измерить мощность излучения, введенную в волокно  $P_{с}$ . Рассчитать коэффициент пропускания соединения источник-волокно  $\tau = P_{с} / P_{и}$ .
7. Сместив волокно 2 в поперечном направлении на 30 мкм, повторить операции п.6 .
8. Сместить волокно 2 в продольном направлении на 30 мкм и снова повторить операции п.6. Сравнить коэффициенты пропускания соедине-

ния источник-волокно, полученные в п.п. 6 –8; результат проанализировать.

9. Закрепить волокна 2 и 5 в трехкоординатном юстировочном устройстве встык, контролируя положение волокон с помощью микроскопа. Добиться максимального показания регистрирующего прибора (6). Изменяя расстояние между торцами, записать показания  $U$  цифрового вольтметра (7) для каждого их положения. Так как фотодиод 6 работает на линейном участке люкс-вольтовой характеристики, то мощность лазерного излучения  $P$  пропорциональна показаниям вольтметра  $U$ .
10. Рассчитать коэффициент ослабления для каждого положения волокон по формуле:

$$\beta = -10 \lg \frac{P}{P_0} = -10 \lg \frac{U}{U_0}, \text{ дБ} \quad (10)$$

где  $U_0$  - показания вольтметра для случая контакта волокон без каких-либо рассогласований. Построить график зависимости коэффициента ослабления от расстояния между торцами.

11. Зафиксировав осевое расстояние между торцами волокон, перемещать одно из них в поперечном направлении, записывая показания цифрового вольтметра  $U$  для каждого положения волокна.
12. Рассчитать коэффициент ослабления для каждого положения волокна по формуле (10). Построить график зависимости коэффициента ослабления от поперечного рассогласования.