

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра містить: 83 стор, 48 рис., 3 табл., 138 джерел.

Метою магістерської роботи є мінімізація втрат в оптичних каналах зв'язку на основі забезпечення самоюстіровки оптичних волокон, і його реалізація в сполучних пристроях для оптичних каналів зв'язку.

Об'єкт роботи – оптичні канали зв'язку.

Предмет роботи – моделі побудови з'єднувальних пристроїв.

Практична цінність результатів. Запропоновано з'єднувальні пристрої для оптичних каналів зв'язку, що використовують самоюстування ОВ, перпендикулярність сколів, яких досягається керованим розколюванням волокон у поверхнево-активної середовищі. Поверхня дзеркально-гладкого відколу, виготовленого за запропонованим способом, суворо перпендикулярна.

Методи досліджень, використані в роботі, засновані на електродинамічної теорії, за допомогою якої досліджено втрати потоку електромагнітної енергії для моди з урахуванням порушення модової структури. Вплив оптико-геометричних параметрів у сполучних пристроях на мікролінз досліджувалося методом чисельного експерименту на ЕОМ. Експериментальні дослідження проводилися на стаціонарній установці в лабораторних умовах.

Обґрунтованість і достовірність досліджень підтверджується зіставленням теоретичних і експериментальних результатів за розробленою методикою і порівнянням з аналогічними результатами інших авторів, контролем розрахунків, фізичною реальністю результатів, надійною роботою і високими параметрами зразків з'єднувальних пристроїв з самоюстіровкой одномодових волокон.

Модель самоюстіровки ОВ апробована в роз'ємних оптичних з'єднувальних пристроях, відколи яких виготовлені керованим розколюванням в поверхнево-активної середовищі і які забезпечують вносяться втрати при стикуванні одномодових волокон $0,17 \div 0,25$ дБ. Створені роз'ємні оптичні з'єднувальні пристрої одномодових і багатомодових волокон з самоюстіровкой ОВ не мають аналогів за внесеним втрат серед аналогічних вітчизняних і зарубіжних з'єднувальних пристроїв.

ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ, З'ЄДНУВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ, СТИКОВКА, НАКОНЕЧНИК, ВТРАТИ, САМОЮСТІРОВКА, ЛІНЗА, КАНАЛ ЗВ'ЯЗКУ

ABSTRACT

Explanatory note to the master's thesis work includes: 83 p., 48 fig., 3 tab., 138 sources.

The purpose of the master's work is to minimize the losses in the optical link by providing samoyustirovki optical fibers, and its implementation in the connecting devices for optical communication channels.

The object of the – optical links.

Scope of the work – the model building connectors.

The practical value of the results. Proposed connectors for optical communication channels using samoyustirovku OF perpendicular chipping which reached controlled cleaving fibers surfactant medium. The surface of the mirror-smooth cleavage produced by the proposed method, strictly perpendicular.

Research methods used in the paper are based on an electrodynamic theory, with which investigated the loss of the electromagnetic energy for fashion and not taking into account the violation of the mode structure. The influence of optical and geometrical parameters of connecting devices to the microlenses was investigated by numerical simulation on a computer. Experimental studies were carried out on a stationary installation in the laboratory.

The validity and reliability of the research is confirmed by comparing the theoretical and experimental results on the developed technique and comparing the results with those of other authors, the control calculations, the physical reality of the results, reliability and high performance designs samoyustirovkoy connectors with single-mode fibers.

Model OF samoyustirovki tested in detachable optical coupling devices, chips are produced in controlled cleaving surfactant environment, which provides an insertion loss when coupling monomode fibers $0,17 \div 0,25$ dB. Split by optical couplers single-mode and multimode fibers with samoyustirovkoy OB are unique in insertion loss among similar domestic and foreign connectors.

OPTIC FIBER, ELECTROMAGNETIC FIELD, THE CONNECTOR, DOCKING, TIP, LOSS, ADJUSTMENT, LENSES, LINK CHANNEL

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| СОДЕРЖАНИЕ | 6 |
| ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ | 7 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 8 |
| 1 АНАЛИЗ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ВОЗНИКАЮЩИХ В НИХ ПОТЕРЬ | 11 |
| 1.1 Вносимые потери при соединении концов одномодовых и многомодовых волокон | 11 |
| 1.2 Потери оптического сигнала из-за коррозии и старения торца волокна..... | 26 |
| 1.3 Выводы по разделу | 31 |
| 2 ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ МИНИМИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ СТЫКОВКЕ ОДНОМОДОВЫХ И МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОН | 33 |
| 2.1 Минимизация потерь в соединительных устройствах, построенных на микролинзах | 33 |
| 2.3 Минимизация потерь в соединительном устройстве одномодовых и многомодовых волокон с помощью самоустирковки ОВ | 52 |
| 2.4 Выводы по разделу | 57 |
| 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ СТЫКОВКЕ ВОЛОКОН | 59 |
| 3.1 Методика расчёта потерь, вносимых в оптические каналы связи..... | 59 |
| 3.2 Методика измерений потерь, вносимых оптическими соединительными устройствами..... | 63 |
| 3.3 Обработка результатов эксперимента по измерению потерь в соединительном устройстве оптического канала связи..... | 66 |
| 3.4 Выводы по разделу | 74 |
| ВЫВОДЫ..... | 75 |
| ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК..... | 77 |

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

АИС – автоматизированная информационная система

ВДТ – видеотерминал

ГОСТ – государственный стандарт

КЕО – коэффициент естественного освещения

КС – компьютерная сеть

ОВ – оптическое волокно

ОСУ – оптическое соединительное устройство

ППП – пакет прикладных программ

РВЦ – резервный вычислительный центр

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ВВЕДЕНИЕ

Многokратно возросшие объемы прокладки оптических кабелей, рост емкости кабелей и оптических кроссов выдвигают новые требования ко всем компонентам оптических сетей, в том числе и к оптическим соединительным устройствам (ОСУ).

При всех своих несомненных достоинствах сварные соединения не могут обеспечить оперативную реконфигурацию оптических каналов связи. В первую очередь это относится к межагрегатным соединениям на узлах связи, а также к соединительным шнурам контрольно-измерительного оборудования. Они базируются на разъёмных соединительных устройствах, обеспечивающих многократное соединение и разъединение оптических волокон. Разъёмные соединения, как временная мера, могут также применяться при оперативном устранении неисправностей оптических каналов связи, когда невозможно обеспечить быструю и качественную сварку волокон.

К проектируемым разъёмным соединительным устройствам оптических волокон предъявляются весьма противоречивые требования. С одной стороны, они должны обеспечивать минимальные потери в точках соединения, для чего соосное соединение отполированных торцов оптических волокон производится с высокой точностью (например, для одномодовых волокон – до десятых долей микрона). С другой стороны, соединения должны быть механически прочными, многократно и быстро собираться и разбираться, сохраняя при этом заданную величину вносимого затухания.

В общем виде оптическое соединительное устройство состоит из двух разъёмов или, как часто их называют, коннекторов. Их основным элементом являются световоды. Прецизионные наконечники световодов представляют собой цилиндры из диоксида циркония, которые симметрично устанавливаются в плавающие центраторы, которые, в свою очередь, устанавливаются в корпус соединительного устройства. Соединительные устройства могут быть однотипными или вообще находиться в одном корпусе, но чаще всего состоят из приборной и ответной части, подобно электрическим разъёмам. Соединительные устройства фиксируются при помощи байонетных, резьбовых или замковых соединений. Корпуса могут быть как металлическими, так и пластмассовыми.

Оптические соединительные устройства должны быть простыми по конструкции, обладать безотказностью и надёжностью в эксплуатации, ремонтпригодностью, обеспечивать удобство и простоту сборки оптических каналов связи в полевых условиях, их монтаж и прокладку без использования сложных технологических устройств и персонала высокой квалификации.

Таким образом, построение простых в изготовлении и надежных в эксплуатации соединительных устройств с минимальными вносимыми потерями является важнейшей задачей волоконно-оптической техники.

Целью магистерской работы является минимизация потерь в оптических каналах связи на основе обеспечения самоюстировки оптических волокон, и его реализация в соединительных устройствах для оптических каналов связи.

Объект работы – оптические каналы связи.

Предмет работы – модели построения соединительных устройств.

Основные задачи:

- изучить возбуждение мод при стыковке одномодовых ОВ и провести анализ потерь потока электромагнитной энергии с учетом нарушения модовой структуры;

- определить вносимые потери при угловой и сдвиговой несогласованности сопрягаемых в соединительном устройстве торцов одномодовых и многомодовых ОВ;

- провести анализ оптической системы соединительных устройств на сферических микролинзах и определить возможности коррекции ошибок изображения;

- обосновать метод самоюстировки оптических волокон для создания соединительных устройств с минимально возможными вносимыми потерями;

- разработать способ получения молекулярно-гладкого скола имеющего коррозионностойкую поверхность, строго перпендикулярную оптической оси волокна.

Положения, представляемые к защите:

- разработанный комплекс методик, позволяющий анализировать потери потока электромагнитной энергии, обусловленные нарушением модовой структуры при стыковке одномодовых волокон, и определять допустимые поперечные смещения, углы между осями ОВ и отклонение от параллельности торцов, при которых вносимые потери не превысят заданных;

- результаты теоретического и экспериментального исследования соединительных устройств со сферическими микролинзами и возможность минимизации потерь в таких соединительных устройствах для многомодовых ОВ путем раздельной компенсации потерь по пятну и по углу;

- разработанная методика построения соединительных устройств, основанных на методе самоюстировки ОВ и имеющих малые вносимые потери, достигаемые за счет исключения нарушения модовой структуры и высокоточного совмещения оптических осей волокон;

- результаты разработанного способа получения молекулярно-гладких

сколов, обладающих коррозионно-стойкой поверхностью, строго перпендикулярной оси волокна, в поверхностно-активной среде.

Элементы научной новизны проведенных исследований заключается в следующем:

- получил дальнейшее развитие метод анализа потерь потока электромагнитной энергии, обусловленный нарушением модовой структуры при стыковке одномодовых волокон, что позволило определить допустимые поперечные смещения углов между осями ОВ и отклонение от параллельности торцов, при которых вносимые потери не превысят заданных;

- предложено обоснование метода самоюстировки оптических волокон, позволяющего создавать оптические разъемные соединительные устройства одномодовых и многомодовых ОВ с малыми вносимыми потерями;

- разработана методика определения, с помощью методов электродинамики, потерь электромагнитной энергии, обусловленных нарушением модовой структуры в одномодовых ОВ, при угловой и сдвиговой несогласованности;

- усовершенствованы соединительные устройства для оптических каналов связи, которые основаны на методе самоюстировки ОВ и имеющие малые вносимые потери, достигаемые за счет исключения нарушения модовой структуры и высокоточного совмещения оптических осей волокон.

Практическая ценность результатов. Предложены соединительные устройства для оптических каналов связи, использующие самоюстировку ОВ, перпендикулярность сколов, которых достигается управляемым раскалыванием волокон в поверхностно-активной среде. Поверхность зеркально-гладкого скола, изготовленного по предложенному способу, строго перпендикулярна.

Методы исследований, использованные в работе, основаны на электродинамической теории, с помощью которой исследованы потери потока электромагнитной энергии с учетом нарушения модовой структуры. Влияние оптико-геометрических параметров в соединительных устройствах на микролинзах исследовалось методом численного эксперимента на ПК.

Обоснованность и достоверность исследований подтверждается сопоставлением теоретических и экспериментальных результатов по разработанной методике и сравнением с аналогичными результатами других авторов, контролем расчетов, физической реальностью результатов, надежной работой и высокими параметрами образцов соединительных устройств с самоюстировкой одномодовых волокон.

1 АНАЛИЗ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ВОЗНИКАЮЩИХ В НИХ ПОТЕРЬ

1.1 Вносимые потери при соединении концов одномодовых и многомодовых волокон

В настоящее время для оптических каналов связи изготавливается высококачественное ОВ, имеющее коэффициент затухания не выше $0,1 - 0,3$ дБ/км [9, 28, 29, 32, 87, 106]. Поэтому вносимые потери соединительными устройствами, включенными в состав оптических каналов связи для монтажа, а также высокой ремонтпригодности, не должны превышать $0,17 \div 0,25$ дБ, чтобы разъемные соединительные устройства не вносили в эти каналы существенного ослабления светового сигнала [2, 14, 17, 24, 31, 38, 41, 56, 77].

Поскольку роль разъемного соединительного устройства оказывается решающей с точки зрения определения потерь в оптических каналах связи, разработан большой набор соединительных устройств в различном конструктивном исполнении. Теоретически проанализированы потери в соединительных устройствах различных конструкций, выполнены расчеты по влиянию рассогласования соединяемых концов волокон на потери в соединительном устройстве, а также осуществлены измерения потерь в соединительных устройствах [8, 13, 79, 95, 114, 122].

Выполненные до настоящего времени теоретические исследования и экспериментальные разработки показывают, что рассматриваемый новый тип микрооптического сборочного узла, ответственного за уровень в нем потерь светового сигнала, чрезвычайно чувствителен даже к весьма малым (лежащим на пределе возможностей технологии механической обработки) различным неточностям стыковки, таким как продольный зазор, поперечное смещение и излом под углом осей соединяемых волокон.

Рассмотрим это доминирующее с точки зрения выбора направления конструирования обстоятельство на примере наиболее распространенного так называемого "штекерного" безлинзового соединительного устройства, схема которого представлена на рис. 1.1.

Основными деталями, призванными обеспечить точную непосредственную стыковку торцов ОВ и защитить эти торцы от повреждений, являются цилиндрические наконечники 1 и 2 с вклеенными в них волокнами, вставляемые в общий патрубок 3. Выходное волокно 4 и входное волокно 5 вклеиваются в наконечники. Наличие этой операции вносит большие неточности в фиксацию конца волокна (например, эксцентриситет и излом осей наконечника и конца волокна).

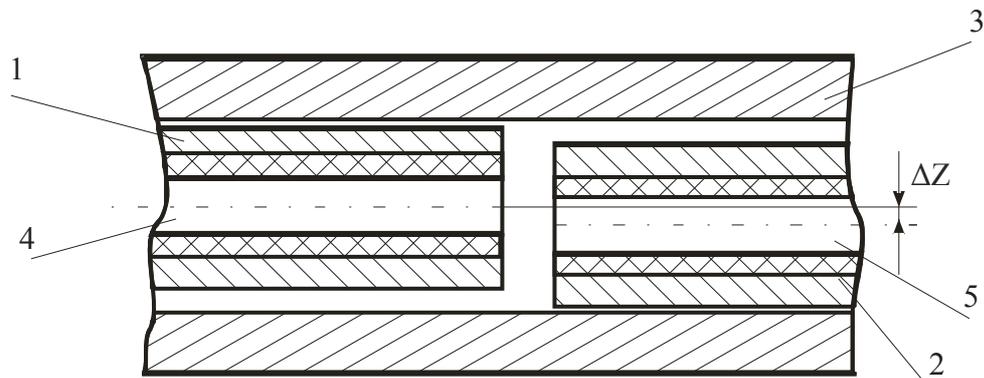


Рисунок 1.1 – Безлинзовое соединительное устройство с наконечниками и вклеенными волокнами

Основными видами рассогласования при стыковке концов многомодовых ОВ с вклеенными наконечниками являются следующие:

- наличие зазора 1 между параллельными торцами (рис. 1.2),
- поперечного сдвига концов оптического волокна – Δ (рис. 1.3),
- угла излома оптических осей волокон – α (рис. 1.4),
- угла неперпендикулярности плоскости скола к оптической оси – β (рис. 1.5).

Эти виды рассогласования дают вклад в потери светового сигнала в месте стыка торцов ОВ [17, 36, 59, 75, 82, 92, 118, 120, 131]:

- наличие микровыступов (шероховатостей на поверхности торцов волокон) (рис. 1.6);
- различная числовая апертура соединяемых волокон (рис. 1.7);
- различные диаметры сердцевин соединяемых волокон (рис. 1.8);
- появление интерференции света в зазоре между торцами волокон [66, 168] (рис. 1.6).

В настоящее время выполнены теоретические расчеты потерь светового сигнала в ОВ. Рассмотрим некоторые из них.

Наиболее очевидным источником потерь в соединительном устройстве являются потери в результате децентрировки, заключающейся в несовпадении параллельных осей стыкуемых волокон. В соответствии с [144, 50] потери I равны:

$$I(\text{дец}) \approx -10 \lg \eta_{\text{дец}}, \quad (1.1)$$

где $\eta_{\text{дец}}$ – коэффициент эффективности [108, 150], определяемый децентрировкой, профилем показателя преломления ОВ, многомодовым составом

оптического излучения. Вводят коэффициент смещения $\frac{\Delta}{a}$,
 где a – радиус сердцевины волокна.

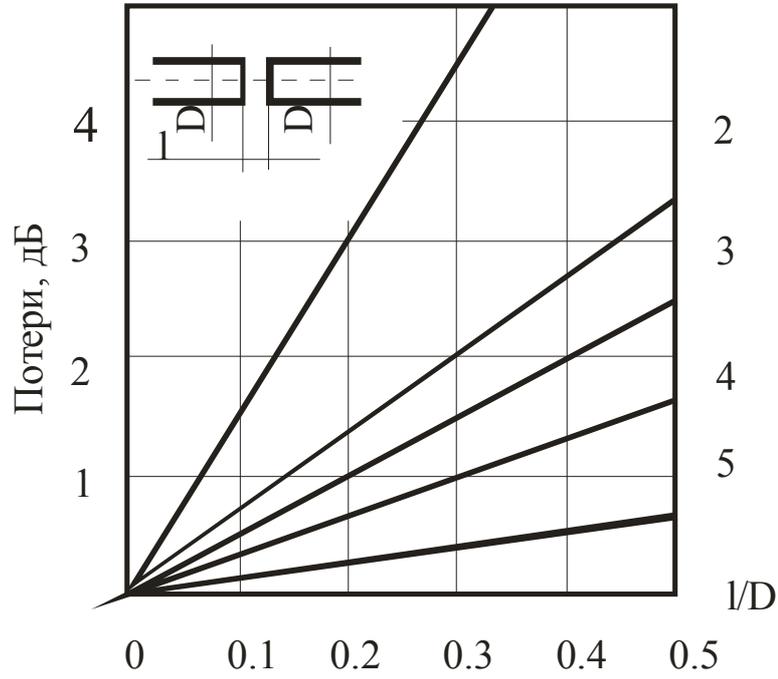


Рисунок 1.2 – Зависимость потерь от продольного сдвига при различных диаметрах ОВ: 1 – 2,5; 2 – 3; 3 – 3,5 и 4 – 5 мкм [66]

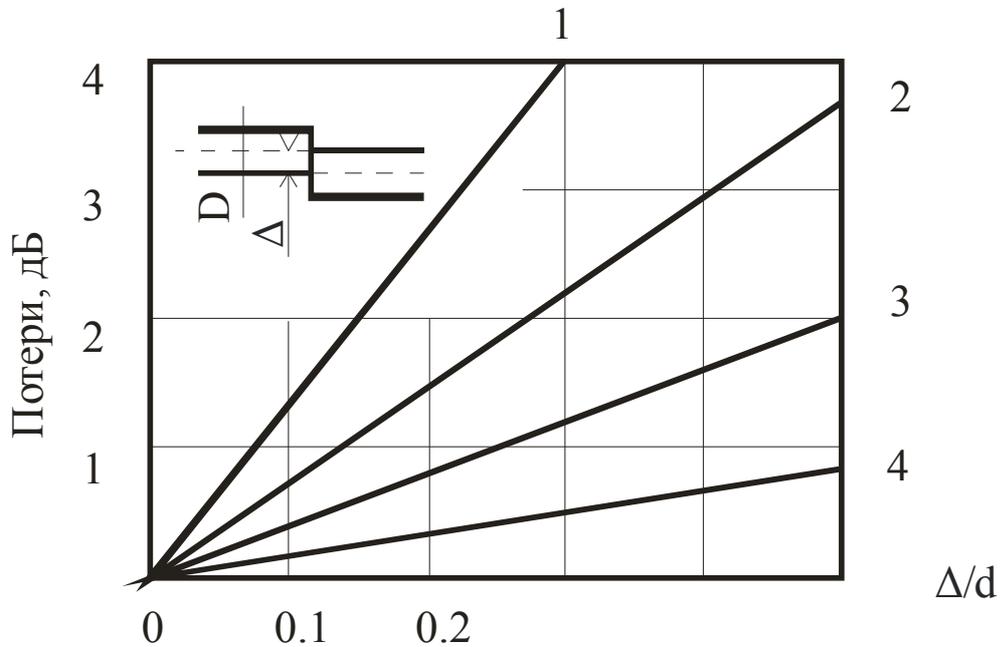


Рисунок 1.3 – Зависимость потерь от поперечного сдвига ОВ при различных диаметрах ОВ: 1 – 2,5; 2 – 3; 3 – 3,5 и 4 – 4,5 мкм [66]

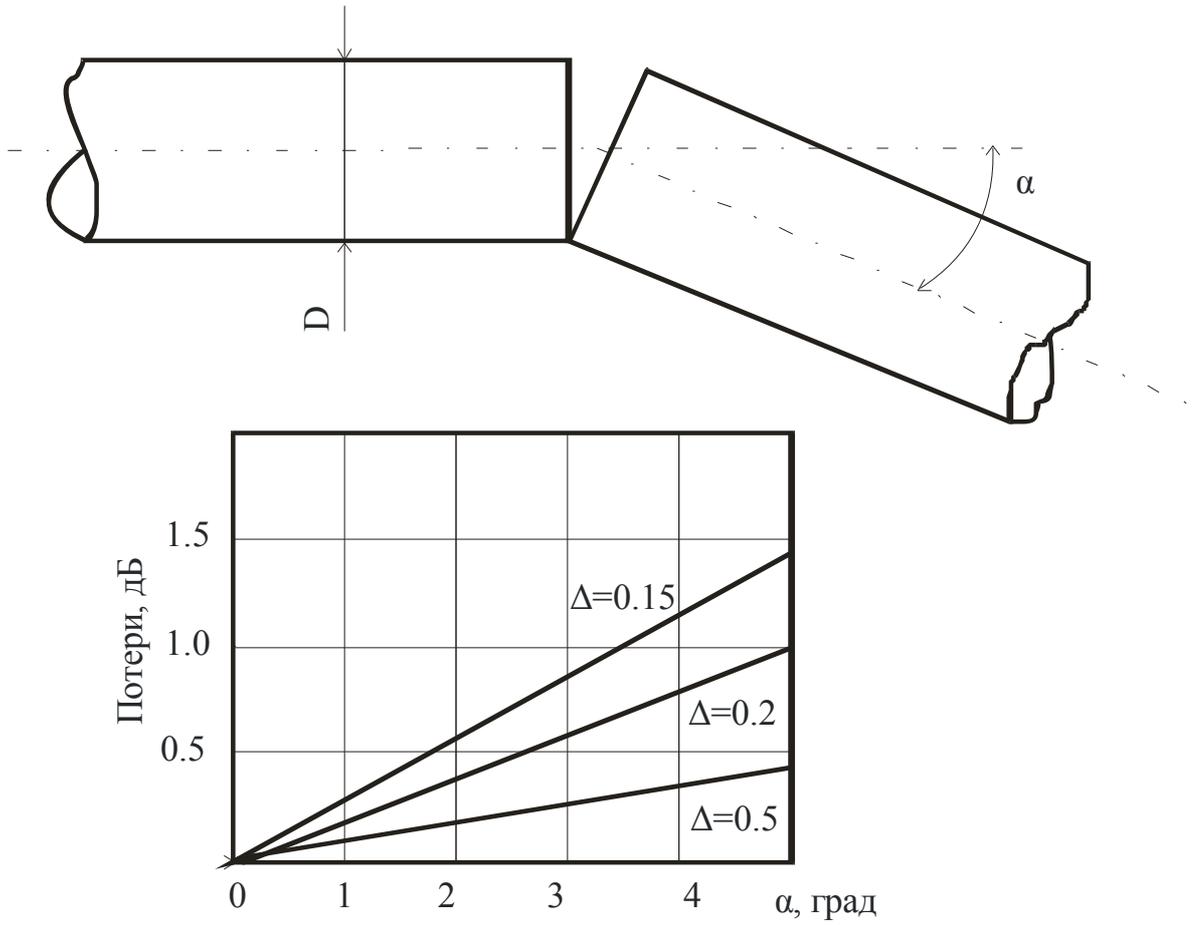


Рисунок 1.4 – Зависимость потерь при стыковке одномодовых ступенчатых ОВ от угла между осями при различных относительных разностях показателей преломления сердцевины и оболочки

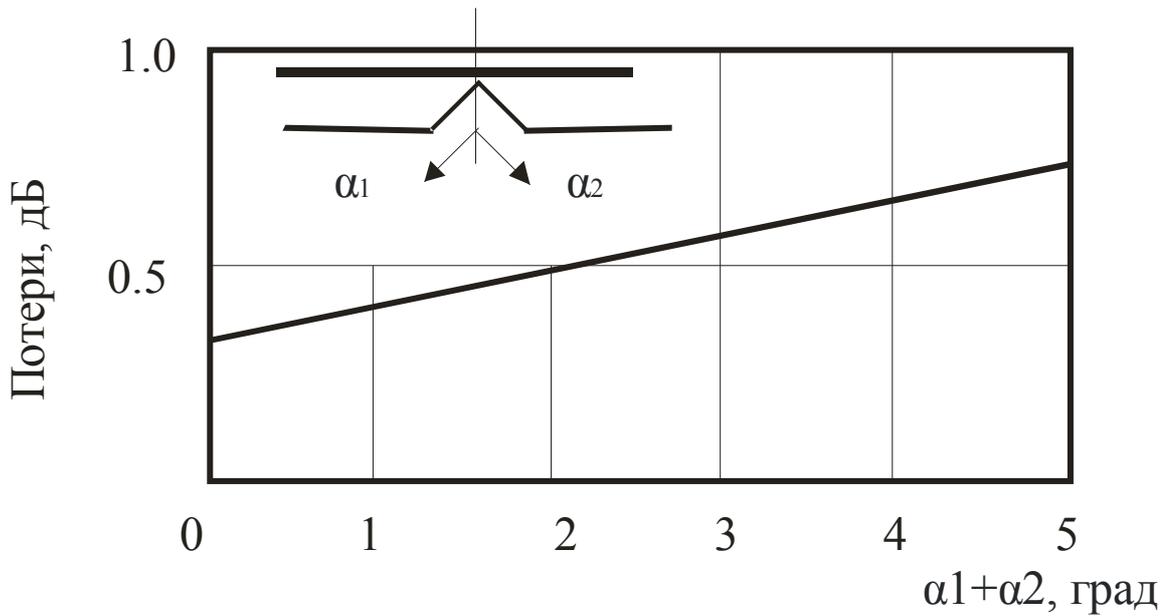


Рисунок 1.5 – Зависимость потерь от неперпендикулярности плоскости скола к оптической оси ОВ [66]

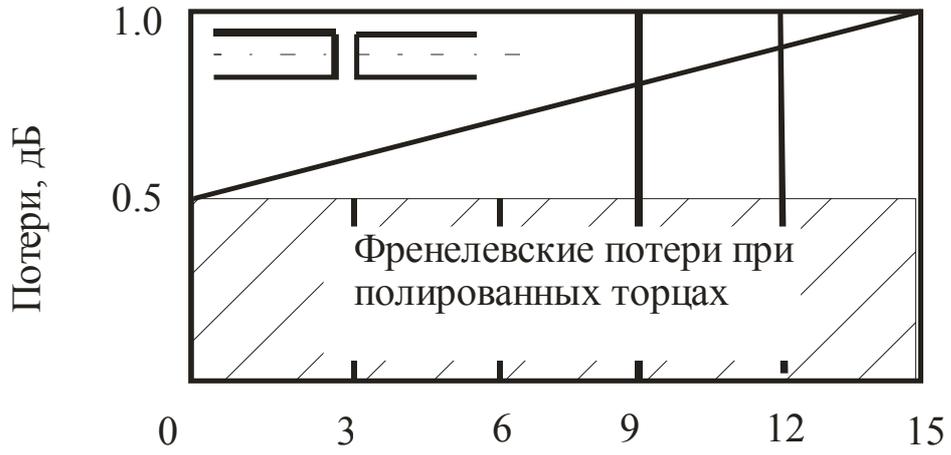


Рисунок 1.6 – Зависимости потерь от шероховатости поверхности торцов ОВ [66]. Среднеквадратическая высота выступов, R_a , мкм

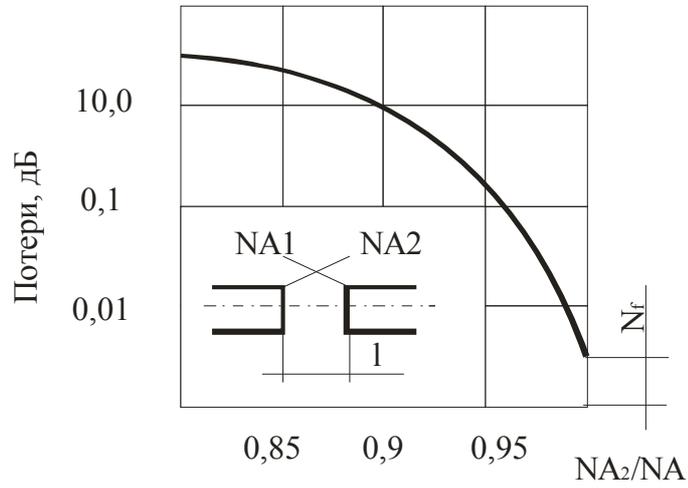


Рисунок 1.7 – Зависимость потерь от соотношения апертур ОВ [66]

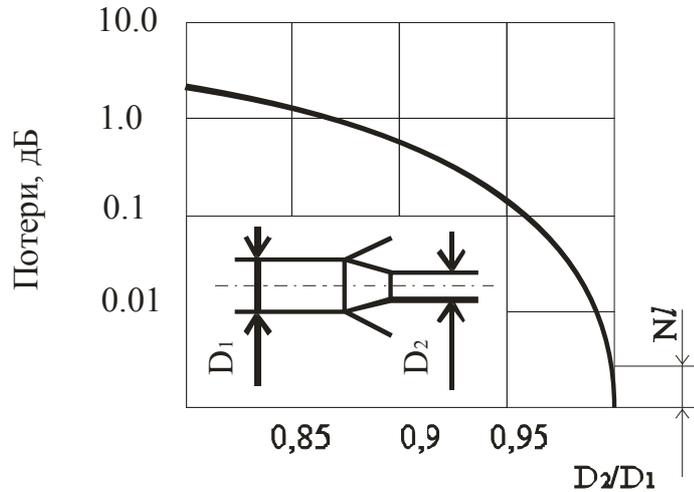


Рисунок 1.8 – Зависимость потерь от соотношения диаметров сопрягаемых ОВ [66]

Для ОВ с градиентным профилем показателя преломления при однородном возбуждении мод

$$\eta_{дец} \approx I - 0,85 \frac{\Delta}{a}. \quad (1.2)$$

С учётом мод оболочки

$$\eta_{дец} \approx I - 0,75 \frac{\Delta}{a}. \quad (1.3)$$

Для ОВ со ступенчатым профилем показателя преломления при однородном возбуждении мод

$$\eta_{дец} \approx I - 0,64 \frac{\Delta}{a}, \quad (1.4)$$

а с учётом мод оболочки

$$\eta_{дец} \approx I - 0,5 \frac{\Delta}{a}. \quad (1.5)$$

Большие потери в соединительном устройстве градиентных волокон обусловлены тем обстоятельством, что числовая апертура последних, будучи максимальной на оси волокна, убывает к периферии сердцевины волокна практически до нуля [140, 142, 147, 149, 162, 164].

Для одномодовых волокон можно подсчитать потери, обусловленные децентрировкой I по формуле [150, 163]

$$I_{дец} \approx -10 \lg e^{-\frac{l^2}{W^2}}, \quad (1.6)$$

где W – параметр, определяющий диаметр луча.

Относительные децентрирующие смещения в большинстве случаев обеспечивают потери менее 0,5 дБ, если $\frac{\Delta}{a} \leq 0,1$.

Последнее означает, что для многомодовых волокон абсолютное значение Δ может составлять, например, при диаметре сердцевины $2a = 50$ мкм величину $\Delta \approx 5$ мкм, а для одномодовых волокон с диаметром сердцевины $2a = 7$

мкм, соответственно точность центрировки должна быть не ниже 0,5 мкм, что находится на пределе возможностей современной механической обработки.

Вторым видом является угловое рассогласование, определяемое углом α излома осей соединяемых волокон.

При стационарном распределении оптической энергии по моде в многомодовом волокне потери определены в работах [17, 82, 114].

Для одномодовых волокон используется соотношение

$$I_{\text{угл.}} \approx -10 \lg \left\{ \exp \left[- \left(\frac{\pi n_1 W \alpha}{\lambda} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1.7)$$

позволяющее вычислить потери из-за излома оптических осей при стыковке.

Здесь n_1 – показатель преломления сердцевинки, λ – длина волны света.

Френелевские потери, обусловленные отражением света от торца, рассчитываются по формуле [17, 168]:

$$I_{\text{ср}} = -10 \lg \left\{ I - 2 \left[\frac{(n_1 - n_0)}{(n_1 + n_0)} \right]^2 \right\}, \quad (1.8)$$

где n_1 и n_0 – соответственно показатель преломления сердцевинки и среды между торцами.

Рассмотренные выше трудности в реализации конструкторско-технологического решения стыковки концов волокон, вклеенных в наконечники, могут быть в значительной мере устранены, если увеличить диаметр светового пучка в пространстве между стыкуемыми оптическими волокнами и уменьшить его расходимость при условии полного попадания светового потока из выходного торца во входной.

При увеличении диаметра светового пучка до 500 мкм и уменьшения его расходимости допуски на поперечные сдвиги при обеспечении требуемого уровня потерь будут гораздо больше, чем для волокон в наконечниках. Например, допуск на боковое – смещение при использовании микролинз составит порядка 10 мкм.

Оптическая система может быть в этом случае построена на градах или сферических линзах с однородным распределением профиля показателя преломления. Наиболее рациональной является система, состоящая из сферических линз с однородным распределением профиля показателя преломле-

ния, поскольку последние являются более технологичными при их массовом производстве и обладают сферической симметрией. Поэтому рассмотрим соединительные устройства построенные на микролинзах.

В линзовом соединительном устройстве пучок, выходящий из выходного торца волокна, расширяется первой линзой, за которой помещается вторая линза, собирающая пучок на торец входного волокна. Существуют две разновидности линзовых соединительных устройств: на микролинзах [60, 165] и на граданах [121 – 124].

Утверждается [21, 24, 62, 92], что линзовые соединительные устройства имеют малые потери. Однако при массовом производстве трудно обеспечить высокое качество граданов и сферических линз.

Оптическая система, содержащая две сферические линзы радиусом R , при фокусировке светового пучка на торце входного волокна в результате ошибок изображения второго порядка даёт изображение светового пучка с диаметром, превышающим диаметр сердцевины. В результате только часть светового потока из выходного волокна пройдет через сердцевину входного волокна, что обусловит значительные потери.

Часть пучка, сходящегося после второй линзы, может не вписываться в числовую апертуру входного волокна, что приводит к дополнительным потерям.

Расширение преобразованного пучка света в межлинзовом пространстве до размеров, соизмеряемых с диаметром линз, многократно снижает требуемый допуск Δ на боковое смещение ($c \pm 1$ до ± 15 мкм).

Столь существенное снижение требований к точности бокового совмещения позволяет достичь потери ниже 0,5 дБ простыми средствами, не прибегая к специальному оборудованию.

Однако наибольшие трудности заключаются в реализации прецизионных оптических параметров высокой точности в изготовлении линз и точности их юстировки по трем осям x , y , z . Смещения по трем осям центров линз должны реализоваться с погрешностью ± 1 мкм, что делает подобную юстировку практически невыполнимой.

В работе [117] использован, прием прецизионного сверления каналов для фиксации концов оптических волокон точно к оси линзовой системы. В этом случае отпадает необходимость юстировки центров линз по осям y и z .

Однако остается необходимость их точной продольной (в дооптической оси системы) юстировки, которая также является сложной операцией, поскольку должны быть осуществлены две взаимосвязанные задачи: уменьшение пятна на торце входного волокна до размеров, при которых оно полностью впишется в периметр торца. Кроме того, при продольной юстировке

конус сходящегося пучка должен быть полностью вписан в числовую апертуру входного волокна.

В работе [107] предлагается для реализации продольной юстировки использовать уникальный прецизионный манипулятор, требующий квалифицированного персонала.

Таким образом, переход от безлинзовых соединительных устройств к линзовым, как видно из рассмотренного примера, не снижает трудности. Вместо волокон необходимо юстировать линзы.

Разновидностью линзовых соединительных устройств являются соединительные устройства, использующие градиентные стержневые линзы. Этот вид линз, называемых также "граданами" или "селфоками", разработан и предложен в работах [13, 59, 70, 78, 81, 131, 131].

Граданы имеют простую геометрию (цилиндр с перпендикулярными торцами) и радиальный градиент профиля показателя преломления, описываемый выражением:

$$n^2(r) = n_0^2 \sec h^2(gr), \quad (1.9)$$

где n_0 – показатель преломления на оси цилиндра;

r – радиус точки измерения;

g – положительная константа.

Будучи представленной в виде полинома, например, шестой степени, формула (1.9) при некоторых конкретных значениях коэффициентов упрощается. Так, при $g = 1/4$ и $p=1,5$ она приводится к виду:

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{A}{2} - r^2 \right), \quad (1.10)$$

где A – положительная константа.

Диаметр D фокального пятна в граданах с оптимальным технологическим режимом равен:

$$D = 1,22\lambda \left(n_0 \sqrt{AR} \right), \quad (1.11)$$

где R – внешний радиус градана.

Числовая апертура граданов максимальна в центре и убывает до нуля на периферии:

$$NA_{\max} = 2\sqrt{An_0}R, \quad (1.12)$$

Меридиональные лучи распространяются по синусоидальным траекториям с периодом T_G

$$T_G = \frac{2\pi}{\sqrt{A}} \quad (1.13)$$

Если длина градана равна $T_G/4$, то он является коллиматором с фокусом на плоской торцовой поверхности.

Это является важным преимуществом граданов такого типа, т.к. торцы волокна и градана могут быть соединены встык, и в отличие от оптической системы на линзах отпадает необходимость юстировки расстояний между граданом и волокном. Граданы широко применяются в электрооптических системах, светокопировальной технике и вычислительной технике [34, 40, 70, 72, 75, 78, 81].

Расширенный и параллельный пучок, например, при диаметре градана 2 мм и числовой апертурой $NA = 0,2$ проходит без существенных потерь в приемный градан, удаленный на расстояние 4 см, а для градана 5 мм и $NA = 0,6$ на расстояние в 8 см.

Градиент показателя преломления создается нейтронной бомбардировкой, химическим осаждением из газовой фазы, полимеризацией, ионным обменом и т.п. [64].

Главным требованием является изготовление цилиндра с наибольшим диаметром, с заданным профилем показателя преломления и возможностью оптимизации профиля для устранения ошибок изображения [21].

Отклонение от оптимального профиля приводит к положительным или отрицательным аберрациям [47, 51], расширяющим фокальные пятна.

Из сказанного следует, что массовое изготовление граданов с оптимальным показателем преломления является трудной задачей. Даже, если решить ее физико–химическую материаловедческую часть массовое производство граданов потребовало бы полной автоматизации этого процесса на основе использования робототехнических систем.

Сопоставительный анализ двух основных типов соединительных устройств (линзового или безлинзового) не позволяет выявить настолько очевидных преимуществ какого–либо из них, чтобы отбросить второй, как явно непригодный.

Поэтому в данной работе детально проанализированы оба варианта. На

основе этого анализа и после выполнения в работе теоретических расчетов и экспериментального исследования моделей соединительных устройств обоих типов удастся однозначно решить, какой из типов соединительных устройств лучше в технологическом и эксплуатационном отношении.

Как указывалось, для безлинзовых соединительных устройствах необходимо прецизионное (допуск ± 1 мкм) совмещение выходного и входного торца волокна. Поскольку конструктивное и технологическое решение этой задачи находится на пределе возможностей современной техники, в конструкторских разработках широко распространились эвристические приемы, которые направлены на уменьшение технологических трудностей при совмещении концов ОВ.

Наиболее широко известно соединение концов волокон с помощью *V*-образной канавки [14, 24, 43]. Этот способ соединения иллюстрируется на рис. 1.9. Если два конца волокна одинаковы по диаметру (например, две части одного разреза), то канавка идеально их отъюстирует. Недостаток этой системы заключается в том, что, если диаметры концов волокон различны, то конец с меньшим диаметром расположится в канавке ниже конца с большим диаметром и получит дополнительное вертикальное поперечное смещение. Кроме того, возникают трудности сборки-разборки и ремонта в автономных объектах и в полевых условиях [43 – 46, 50, 98, 101 – 104].

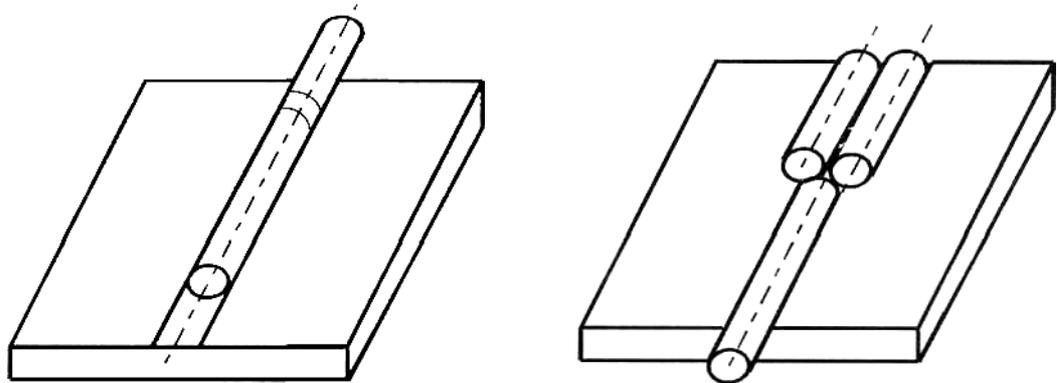


Рисунок 1.9 – Соединение волокон с использованием *V*-образной канавки [43]

Идея *V*-образной канавки, будучи приспособленной к радиально-симметричной конструкции, реализована в многоволоконном соединительном устройстве, представленном на рис. 1.10 и 1.11 [45, 98].

На использовании *V*-образной канавки основан многоволоконный соединитель с зажимным неразборным деформационным [99] (рис. 1.12) и разборным (рис. 1.13) узлом стыковки волокон [44].

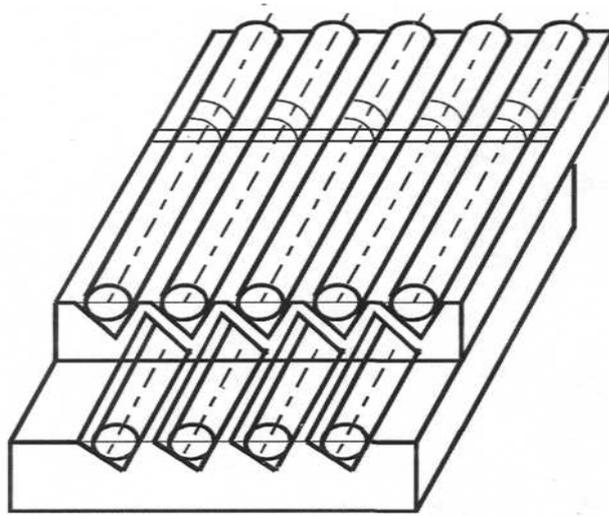


Рисунок 1.10 – Соединение группы волокон с использованием V-образной канавки [98]

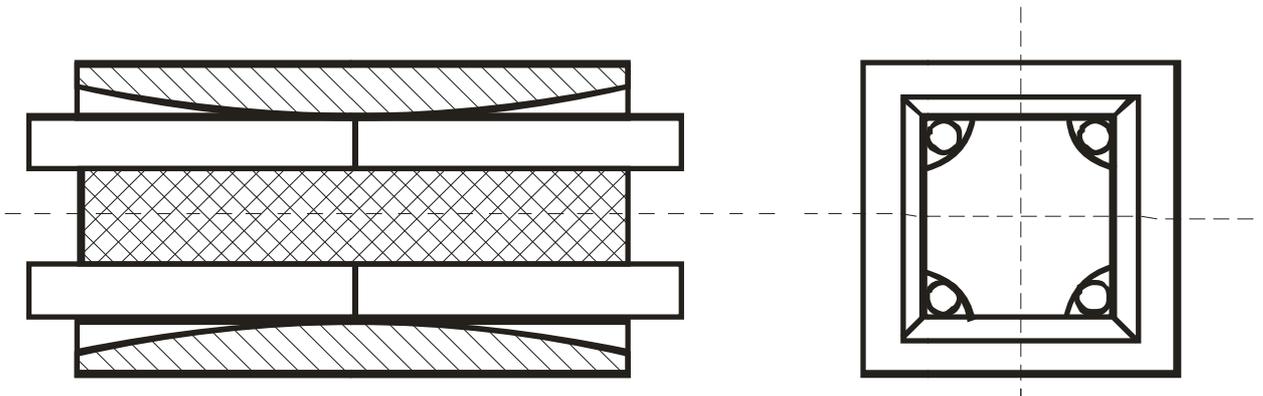


Рисунок 1.11 – Многоволоконное соединительное устройство, использующее модификацию V-образной канавки [44]

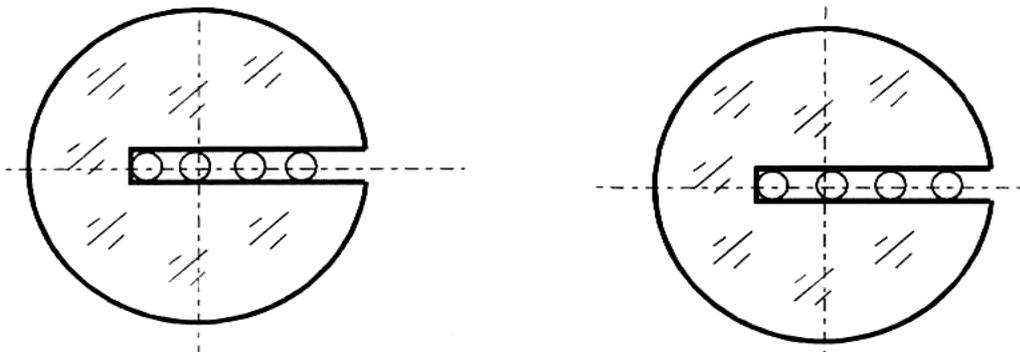


Рисунок 1.12 – Многомодовое соединительное устройство с неразборным деформационным узлом стыковки до и после сжатия [45]

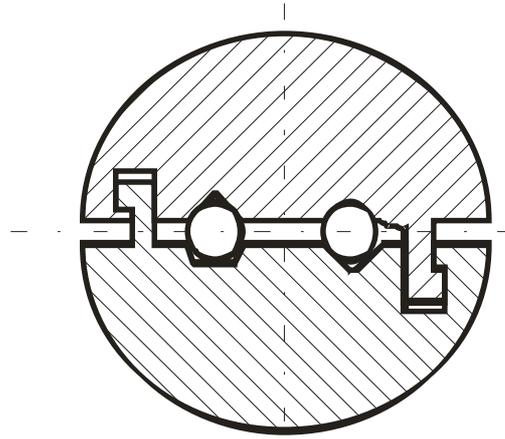


Рисунок 1.13 – Многомодовое соединительное устройство с разборным узлом стыковки [45]

Основной недостаток этой конструкции состоит в том, что пластинка с *V*-образной канавкой изготавливается из материала с твердостью, близкой к твердости стекла, и точность изготовления должна быть высокой. Последнее необходимо [47, 10] чтобы зажим жесткими деталями не привел к разрушению волокна.

В связи с этим наиболее прогрессивным направлением в построении зажимных узлов соединительных устройств представляется использование в них эластомеров [49].

Известно зажимное устройство с *V*-образной канавкой, изготовленной в соединительном элементе из эластомера (рис. 1.14) [46].

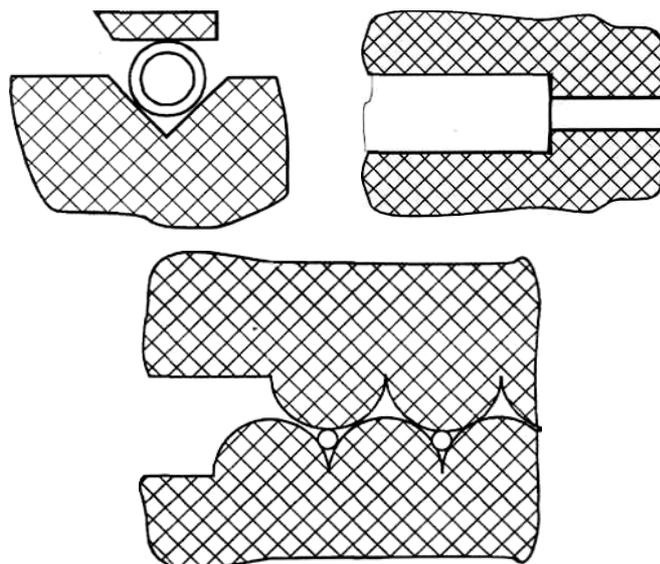


Рисунок 1.14 – Зажимные устройства с *V*-образной канавкой в эластомере [46]

Волокна, уложенные в канавку, зажимают эластичным элементом. Под действием приложенной силы волокно зажимается по трем линиям (аналог трёхкулачкового зажимного устройства). Если волокна имеют одинаковый диаметр, то их концы выравниваются строго по центру и сносно друг другу. Отличие от названных выше зажимных узлов с *V*-образной канавкой состоит в том, что не создаются разрушающие волокна усилия. Однако при изготовлении деталей зажимного узла возникают трудности, вызванные особыми свойствами высокополимерных материалов, которые наименее изучены.

Поэтому, несмотря на перспективность эластомеров, во многих случаях предпочитают использовать наиболее твердые материалы, такие как керамика и часовой камень (рис. 1.15 – 1.22) [47, 101 – 105].

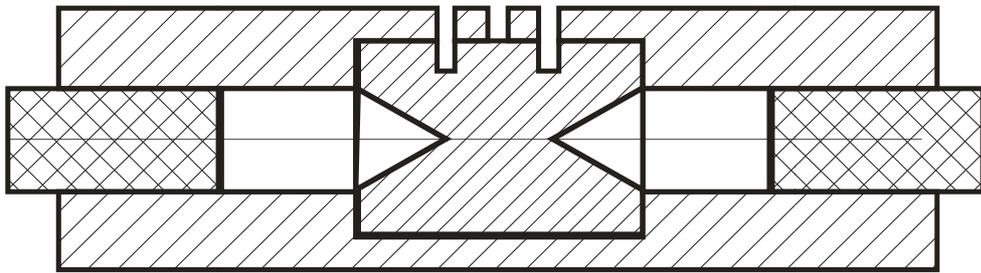


Рисунок 1.15 – Соединительное устройство с модифицированной *V*-образной канавкой [47]

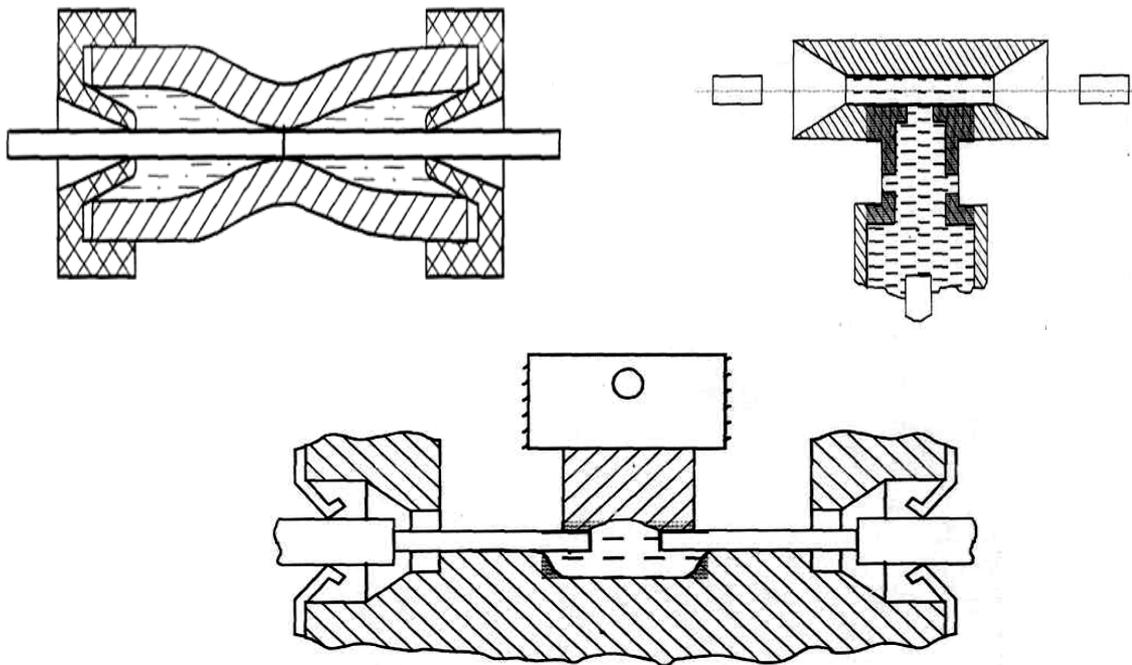


Рисунок 1.16 – Соединительные устройства с иммерсионной жидкостью [42, 51, 52]

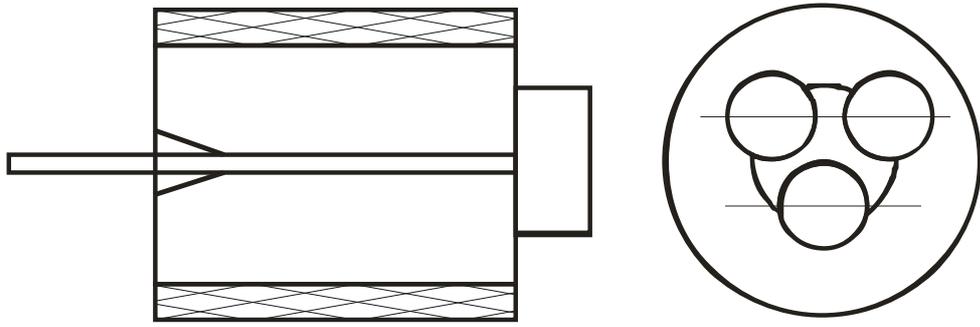


Рисунок 1.17 – Самоцентрирующее соединительное устройство с тремя кулачками [103 – 104]

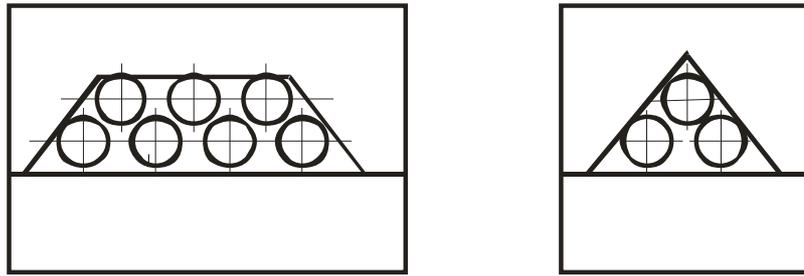


Рисунок 1.18 – Многоволоконное соединительное устройство [102]

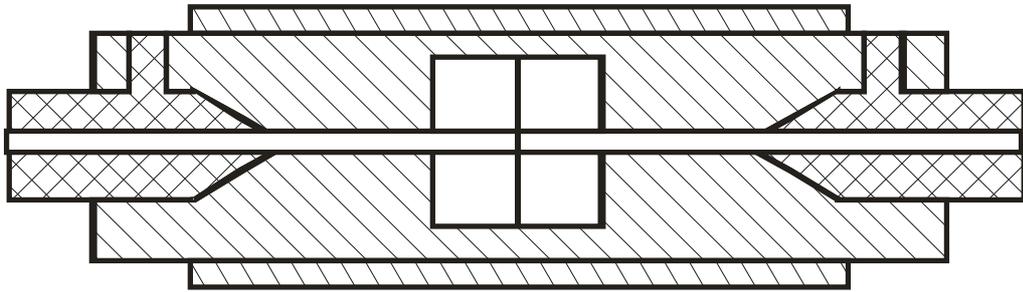


Рисунок 1.19 – Соединение с каналом, полученным после извлечения проволоки из заливки [100]

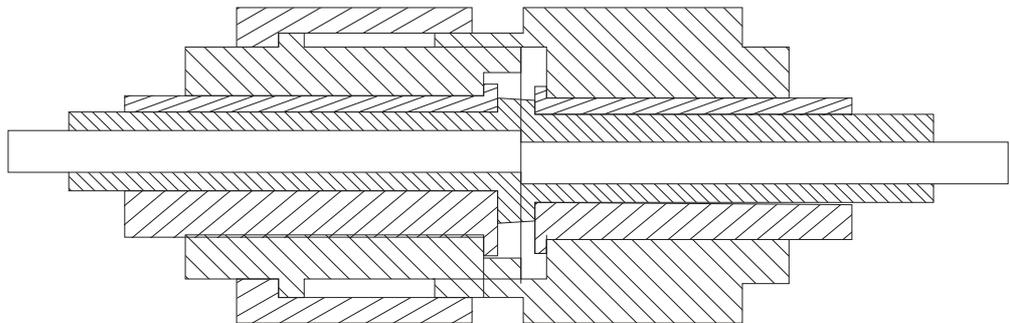


Рисунок 1.20 – Соединительное устройство с эксцентриковыми втулками

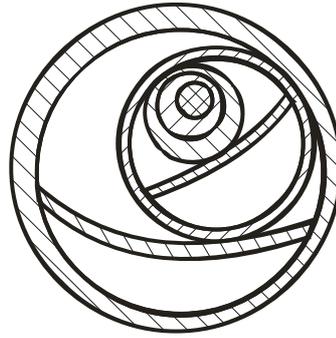


Рисунок 1.21 – Соединительное устройство с пружинами для устранения люфта [105]

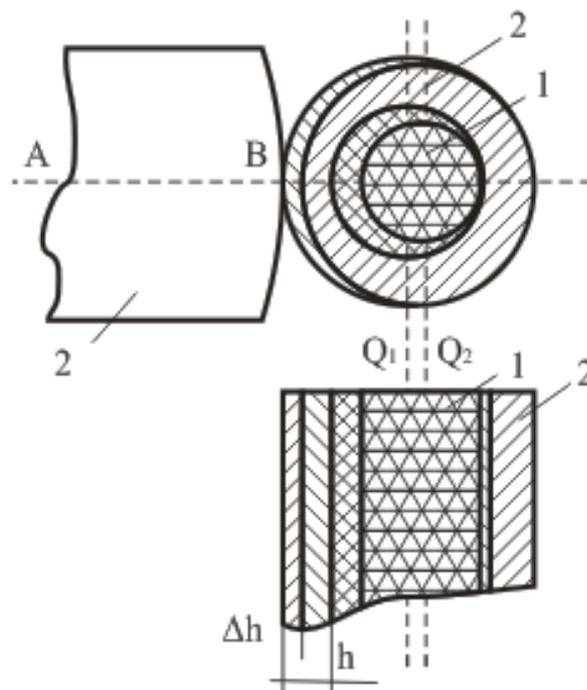


Рисунок 1.22 – Доводка наконечника соединительного устройства с клееными волокнами

Однако для реализации этих конструкций необходимо выдерживать жесткие допуски и предварительно готовить торцы волокон, которые к тому же легко повреждаются (на них возникают отколы), необходим весьма тщательный отбор волокон одинакового диаметра.

1.2 Потери оптического сигнала из-за коррозии и старения торца волокна

Под действием атмосферной влаги стекло стареет, что приводит к помутнению и вносит дополнительные потери.

Как известно, стекло корродирует. Этот процесс интенсифицируется за счет нарушения поверхности скола волокна при шлифовке и полировке.

Кинетика коррозии определяется не только химическим составом стекла, но и механическим, структурным и физико–химическим состоянием внешнего слоя, соприкасающегося с окружающей средой [11, 27, 69, 93, 119, 128].

Действие воды по сравнению с сильными кислотами отличается количественно, а не качественно. Коррозионная стойкость стекла является функцией двух основных переменных: химического состава стекла и состава внешнего слоя. Доминирующим фактором является процентное содержание кремнезема и степень поляризации кремния в соответствии с полной химической формулой стекла, включающей модифицирующие добавки [11, 10, 132].

Важную роль при химическом взаимодействии играют образующиеся на поверхности стекла продукты коррозии. Стекла, содержащие слабо поляризованные ионы кислорода, считаются менее стойкими по сравнению со стеклами, содержащими сильно поляризованный кислород [27, 93].

Стекло химически стойко при оптимальном сочетании физико–химических свойств и структуры приповерхностного слоя, а также при наличии продуктов коррозии в приповерхностном слое, защищенном вновь образованной пленкой [27, 132].

Различают следующие виды коррозии:

- общая – она слабо влияет на оптические свойства торца волокна, т.к. действует равномерно;
- неравномерная (в пределе избирательная) – наиболее ухудшает оптические свойства торца волокна.

На коррозию наиболее влияют внутренние факторы, к которым относятся:

- химический состав (процентное содержание кремнезема SiO_2 модифицирующей добавки и особенно добавок, вводимых в волокно для изменения его коэффициента преломления);
- фазовый состав (процентное соотношение аморфизированной фазы с оборванными или пассивированными химическими связями томов и цепочной упорядоченной и однонаправленно упакованной структурой);
- субструктурный фактор (относительные размеры, расположение и характер размещения областей двух рассмотренных в п. 2 типов структур, анизотропия упорядоченных однонаправленных цепочечных);
- фактор механической оплошности (наличие, характер и геометрия, а также ориентировка микротрещин);

– фактор остаточных механических напряжений.

Наиболее важным для коррозии является показатель концентрации в стекле водородных ионов (pH среды).

Атомы и ионы водорода, из-за предельно малых размеров свободно приближаются на расстояния межатомного взаимодействия к стеклу и проникают в углубления на поверхности и под нее через междуузельные пустоты.

Уменьшение pH^+ раствора, обуславливающее повышение активности ионов H^+ , приводит, как правило, к возрастанию скорости коррозии т.к. увеличивается концентрация ионов OH^- .

Эти ионы легко подходят к атомам поверхности и активно вступают в химическую связь (образуют так называемую водородную связь).

Эта первичная реакция порождает целый ряд вторичных, третичных и т.п. реакций, которые в целом существенно интенсифицируют растворение и коррозию стекла.

Важную роль при взаимодействии стекла с растворами, содержащими ионы H^+ , OH^- играют электрохимические явления, и возникновение двойного заряженного слоя у поверхности стекла. Параметром, характеризующим эти процессы, является электрокинетический потенциал, называемый также Z -потенциалом. Для кварца, например, он в дистиллированной воде в широких пределах зависит от степени очистки его поверхности: без очистки при $pH = 6$, Z -потенциал равен 13,0 после очистки в кислоте при pH в 6,8 он возрастает до 44,2. В практическом отношении это означает, что чем чище шлифованный и полированный торец волокна, тем интенсивнее идет его старение, т.к. совершенно чистая поверхность стекла наиболее реакционноспособна [27, 110, 132].

При повышенных температурах 300 °С pH существенно влияет на фазовые превращения кварцевого стекла. Например, при увеличении pH ускоряется превращение стекла в кристаллическую фазу кристоболит и кварц.

Квазикристаллическая тетраэдрическая структура воды по [11], также циклоцепочечные ассоциаты в воде значительно изменяются под действием температуры и концентрации растворенной соли или других электролитов.

Это существенно меняет химическую активность воды. Например, с повышением температуры в воде возрастает число молекул воды, лишенных водородных связей. Выше 100 °С квазикристаллическая структура и структура циклоцепочечных ассоциатов полностью распадаются, и вода состоит исключительно из отдельных молекул, называемых гидролями. При этом количество гидроксильных концов, равное удвоенной концентрации молекул воды, становится максимальным, как и концентрация ионов, в соответствии с

законом действующих масс.

Каркасная рыхлая структура воды разрушается при увеличении давления.

На поверхности стекла вода из пара адсорбируется за счет действия сил Ван-дер-Ваальса и поверхностного комплексообразования с участием водородных связей с гидроксильными группами кремневой кислоты (хемосорбция). Кроме того, возникают более глубокие химические процессы. Поскольку пары воды растворяются в стекле в малых концентрациях, здесь применим закон Генри [63, 69, 110, 132]:

$$C = h \cdot P, \quad (1.13)$$

где C – количество поглощенной влаги (г/м^3);

P – давление паров воды, (атм.);

h – коэффициент растворимости, ($\text{г/м}^3 \text{ атм.}$).

На рис. 1.23 показана зависимость глубины разрушения при коррозии стекла дистиллированной водой под действием вибрации в атмосферных условиях.

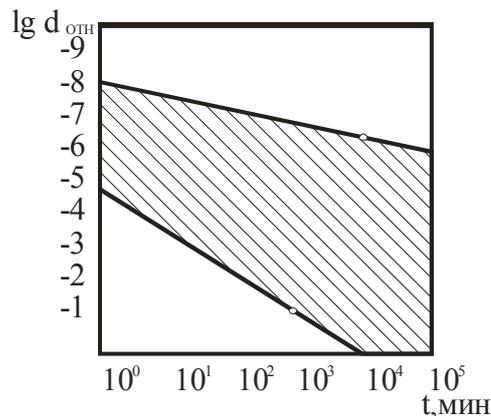


Рисунок 1.23 – Зависимость относительной глубины коррозии стекла от времени от толщины образца, равной 5 мм [93]

Видно, что глубина разрушения достигает несколько микрон, а за время десятков минут может достигать единиц миллиметров [93].

$$d_{отн} = \frac{d_k}{d},$$

где d_k – глубина коррозии;

d – толщина.

Полный объем адсорбированной воды на поверхности стекла находят по формуле [93]:

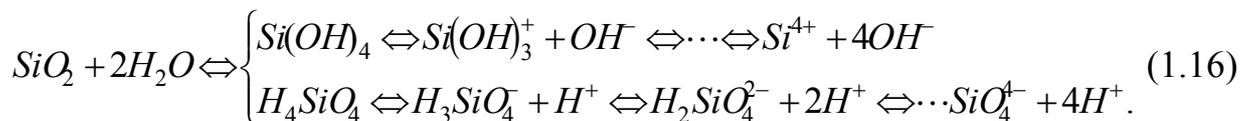
$$V_B = \frac{VC_B\varphi}{1 - \varphi[1 + (C_B - 1)]}, \quad (1.14)$$

где $\varphi = \frac{P}{P_0}$ – относительная влажность, P – давление пара H_2O ; P_0 – давление насыщенных паров при данной температуре и атмосферном давлении;

$$C_B = \exp\left(\frac{L - L_2}{KT}\right), \quad (1.15)$$

где L – средняя теплота адсорбции воды в первом мономолекулярном слое, имеющем объем V ;

L_2 – теплота конденсации водяного пара. Химические формулы взаимодействия SiO_2 с водой имеют вид



С увеличением степени ковалентности связей в стекле растворимость падает, и равновесие в реакции (1.16) смещается влево.

Химическая стойкость стекол по отношению к воде улучшается при введении в состав стекла окислов, расположенных в ряду: BaO , SrO , PbO , MgO , BeO , ZnO , TiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 [132].

При соприкосновении стекла с водой в результате гидролиза щелочных и щелочноземельных силикатов, имеющих в стекле, за несколько минут возникает тонкая (1 – 35 нм) кремнеземная пленка, которая прочно сцеплена с основной массой стекла. Пленка существенно пориста и представляет по структуре кремнеземистый каркас, ячейки которого заполнены вторичной кремнекислотой, появляющейся за счет выщелачивания поверхностного слоя стекла. Показатель преломления и плотность пленки меньше, чем у корродированного стекла.

Пленка играет защитную роль и замедляет глубинную коррозию. У боратных и фосфатных стекол, не содержащих кремнезема, подобной пленки не образуется [27].

При изготовлении стекла и его термической обработке подвижные ионы диффундируют к поверхности из объема, и некоторые компоненты улетучиваются вследствие ионного обмена, используемого для создания стекол с повышенной прочностью, термостойкостью, особыми оптическими свойствами и т.д. Поэтому структура поверхностного слоя существенно изменяется.

Твердые частицы с острыми краями, царапая стекла, создают поверхностные царапины, которые при наличии остаточных термических напряжений и под влиянием попавшей в них воды, благодаря ее поверхностно-активным свойствам, превращаются в микротрещины. Названный недостаток шлифовки и полировки торцов заставляет избрать одно из двух возможных направлений – введение иммерсионной жидкости в место стыка или осуществление зеркального скола.

Введение иммерсионной жидкости устраняет влияние неровностей и шероховатостей качественного скола. В случае шлифованного и полированного торца эта жидкость защищает торец от воздействия агрессивных компонентов атмосферы. Однако, соединители с иммерсионной жидкостью неудобны при многократном соединении-разъединении из-за вытекания последней в случае отсутствия хорошей герметизации. Поэтому альтернативным способом является изготовление зеркального скола, который не нуждается в шлифовке и полировке.

1.3 Выводы по разделу

Проведенный анализ факторов, обуславливающих вносимые потери при соединении концов одно- и многомодовых ОВ, для основных наиболее распространенных конструкций стыковочных узлов современных соединительных устройств показывает:

1) Штекерная конструкция ОСУ при использовании для безлинзовой стыковки концов ОВ имеет ряд существенных недостатков: значительные поперечные смещения и излом осей стыкуемых концов волокон, повышающие уровень потерь, и наличие операции шлифовки и полировки торца вклеенного в наконечник конца волокна.

Для устранения первого недостатка необходимо существенное усложнение технологического процесса. Второй недостаток – повреждение поверхности скола шлифовкой и полировкой – органически присущ этой конструкторско-технологической разработки.

2) Для стыковочного узла со сферическими линзами отсутствуют простые конструктивные решения, реализация которых позволила бы просто и надежно осуществлять одновременную прецизионную юстировку по углу

вхождения света во входной торец в пределах числовой апертуры и по пятну света, вписанному в этот торец.

Для построения соединительного устройства одномодовых волокон стыковочный узел со сферическими линзами не может быть использован, т.к. при преобразовании пучка света в линзовой системе мода значительно искажается.

Существенным недостатком, общим для стыковочных узлов, использующих однородные сферические линзы и цилиндрические линзы с радиальным градиентом показателя преломления (градины), являются технологические трудности воспроизведения идеальной сферической линзы в первом случае и требуемого градиента показателя преломления – во втором.

3) Стыковочные узлы, использующие принцип *V*-образной канавки, не обеспечивают прецизионной юстировки при стыковке концов волокон различного диаметра, что обуславливает необходимость тщательного предварительного подбора концов волокон с точно одинаковыми диаметрами.

Отмеченные недостатки позволяют сформулировать задачи данной работы:

а) необходима разработка точного теоретического метода расчета потерь в соединительном устройстве, обусловленных нарушением модовой структуры и геометрическими факторами, зависящими от возможных рассогласований стыкуемых концов ОВ;

б) при разработке конструкции стыковочного узла соединительного устройства необходимо принципиально новое решение, свободное от недостатков, рассмотренных в этом разделе, позволяющее стыковать концы ОВ с различными диаметрами и исключаящее искажение модовой структуры светового сигнала;

в) проведенный анализ показал, что важное значение имеет задача изготовления зеркально-гладкого скола ОВ без применения операций шлифовки и полировки, ухудшающих его стойкость к воздействию влаги.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ МИНИМИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ СТЫКОВКЕ ОДНОМОДОВЫХ И МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОН

Основной задачей при разработке конструкции и технологии изготовления соединительного устройства является снижение потерь. Для современного одномодового волокна достигнут коэффициент затухания, равный 0,2 – 0,5 дБ/км, поэтому потери, вносимые соединительным устройством, не должны превышать 0,17 – 0,25 дБ.

Рассмотренный выше анализ влияния рассогласования на потери при стыковке концов ОВ показывает, что конструкция соединительного устройства и технология его изготовления должны обеспечивать весьма жесткие допуски.

В конструкторско-технологических разработках для соединительных устройств используются различные способы минимизации потерь.

Рассмотрим основные из них более подробно.

2.1 Минимизация потерь в соединительных устройствах, построенных на микролинзах

Как показано выше, использование микролинз дает возможность на стыке ОВ расширить пучок до размеров (400 – 1000) мкм. Это снижает требования к радиальной несогласованности в десять раз. Однако микролинзы вносят дополнительные потери, обусловленные ошибками изображения, в результате которых диаметр пятна, сфокусированного на торце приемного ОВ, превышает диаметр сердцевины. Соответственно, апертура сфокусированного пучка превышает апертуру ОВ и вызывает дополнительные потери по "углу".

Рассмотрим оптическую систему, построенную на двух сферических линзах радиусов R_1 и R_2 с однородным распределением профиля показателя преломления n_1 и n_2 соответственно (рис. 2.1).

Расстояние l_1 от торца входного ОВ до центра входной линзы выберем равным f_1 , расстояние l_2 от торца выходного ОВ до центра выходной линзы – f_2 , где f_1, f_2 – фокусные расстояния входной и выходной линз соответственно. Фокусное расстояние для сферической линзы с однородным распределением профиля показателя преломления определяется по формуле [10, 13, 124]:

$$f = \frac{nR}{2(n-1)}. \quad (2.1)$$

$$f = \frac{nR}{2(n-1)}. \quad (2.1)$$

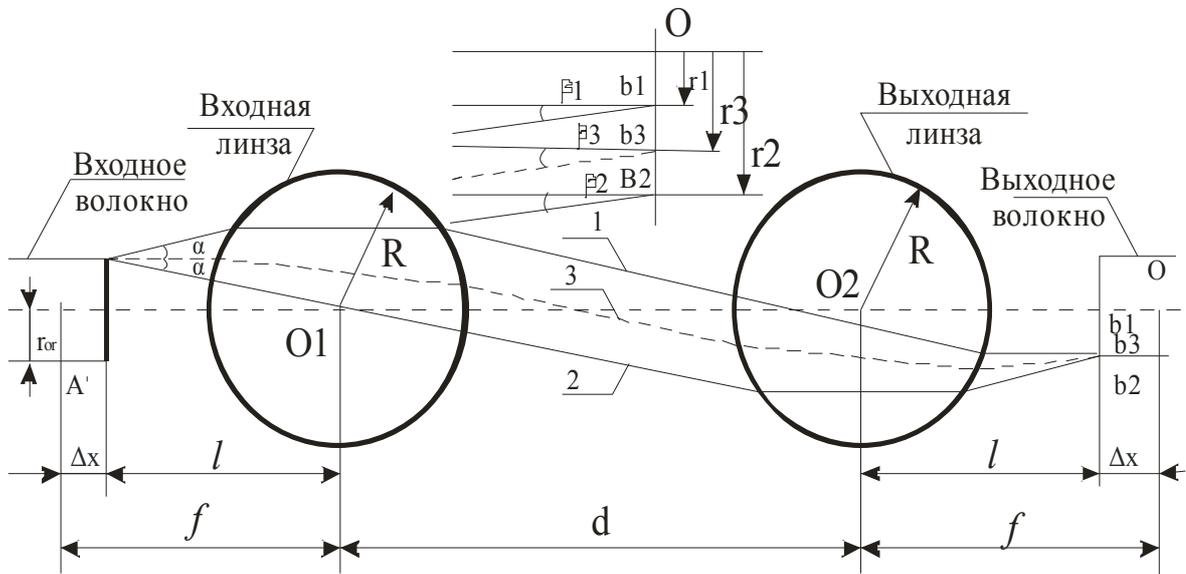


Рисунок 2.1 – Оптическая система соединительного устройства, построенного на микролинзах

Расстояние l_1 от торца входного ОВ до центра входной линзы выберем равным f_1 , расстояние l_2 от торца выходного ОВ до центра выходной линзы – f_2 , где f_1, f_2 – фокусные расстояния входной и выходной линз соответственно. Фокусное расстояние для сферической линзы с однородным распределением профиля показателя преломления определяется по формуле [10, 13, 124]:

Расстояние между линзами обозначим – через 0 . Для симметрии входа –выхода необходимо чтобы $R_1 = R_2, n_1 = n_2$ и, следовательно, $f_1 = f_2 = f_1 = f, l_1 = l_2 = l$. Возьмем $d = 2f$.

Параметры оптической системы, указанные выше, являются оптимальными с точки зрения параксиальности светового пучка и точечного источника света. Однако для рассматриваемых ОВ имеет место конечный поперечный размер источника (диаметр сердцевинки 50мкм) и угол расходимости светового пучка с числовой апертурой $NA = 0,2 - 0,24$, что составляет приблизительно 11–13°. Несмотря на небольшие отклонения параметров светового пучка от параксиальности и источника света от точечного, эти отклонения в силу ошибок изображения оптических систем могут внести значительные оптические потери, превышающие 0,2 – 0,3 дБ.

Потери рассчитываются путем прослеживания хода оптического луча через систему ОВ – линза – ОВ.

При параметрах оптической системы, выбранных оптимальными с точ-

ки зрения параксиальности светового пучка и точечного источника света, получены следующие зависимости оптических потерь от радиуса линзы R при фиксированном показателе преломления n (рис. 2.2).

Так, например, при $R = 400$ мкм и $n = 1,5$ оптические потери из-за превышения диаметра выходного светового пятна над диаметром сердцевины ОВ (оптические потери по пятну) составляют $\sim 2,15$ дБ, а оптические потери из-за превышения угла входа луча в ОВ числовой апертуры NA ОВ (оптические потери по углу) – $0,35$ дБ. Суммарные оптические потери, таким образом, равны $2,5$ дБ. С увеличением радиуса линзы суммарные оптические потери возрастут. При $R = 1000$ мкм ($n = 1,5$) оптические потери составляют $\sim 4,2$ дБ.

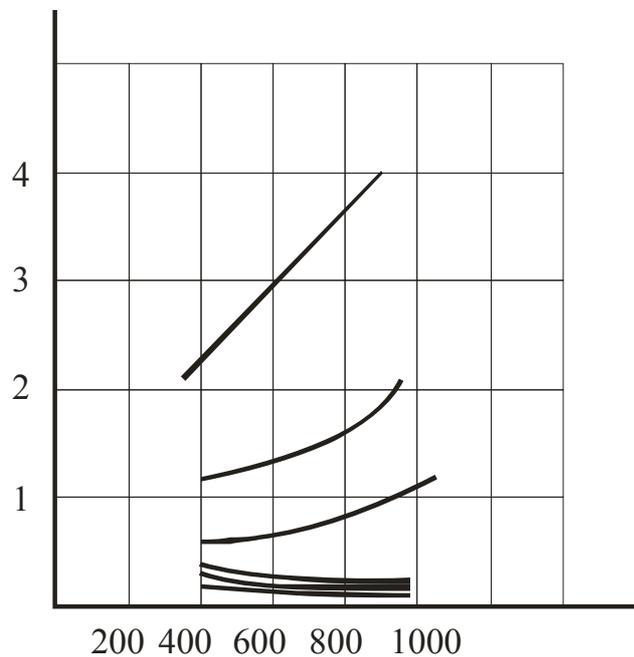


Рисунок 2.2 – Зависимость оптических потерь от радиуса линзы

С ростом показателя преломления n оптические потери по пятну и по углу убывают. Так, например, при $R = 400$ мкм, $n = 1,7$ оптические потери по пятну составляют $1,2$ дБ, а по углу – $0,3$ дБ. Суммарные оптические потери этом находятся на уровне $1,5$ дБ. При $R = 1000$ мкм ($n = 1,7$) суммарные оптические потери составляют $2,1$ дБ.

Оптические потери, приведенные выше, определяются аберрациями оптической системы и обусловлены конечными поперечными размерами сердцевины ОВ (объекта) и отклонениями светового пучка от параксиального.

Рассмотрим источники ошибок изображения, вносимых оптической системой.

Пусть плоскость объекта с осями x_0 и y_0 ортогонально пересекается в точке O с осью Z оптической системы (рис. 2.3). Изображение первого порядка по теории Гаусса лежит в некоторой другой плоскости (x_i, y_i) перпендикулярной к оси, на расстоянии z_i от O . Пусть фокусирующая система представлена плоскостью линзы (x_L, y_L) , параллельной плоскости объекта. Любая точка p_i в плоскости объекта, лежащая на расстоянии r_0 от оси, отобразится, согласно теории параксиальных лучей, в определенной точке p , в плоскости изображения на расстоянии Γ от оси.

Возможная траектория такого луча указана на рис. 2.3 сплошной линией. Эта траектория пересечет плоскость линзы в некоторой точке M на расстоянии r_L от оси. На практике всегда существует некоторое возможное максимальное значение r_L , определяемое апертурой линзы. Действительная траектория, по которой идет луч, выходящий из p , отличается от изображенной на рис. 2.3 траектории PMp_i . Это различие зависит от того, насколько угол, образуемый PM с осью, больше, чем это допускается параксиальными условиями.

Действительная траектория указана на рис. 2.3 пунктирной линией. Она дает точку изображения p_i' , лежащую на расстоянии r_i' от оси. Смещение p_i' по отношению к p_i представляет собой полную поперечную aberrацию $\Delta r_i = r_i' - r_i$. Значение Δr можно выразить в виде степенного ряда, содержащего члены до третьего порядка включительно:

$$\Delta r_i \rightarrow r_0, r_L; r_0^2, r_L^2, r_0, r_L; r_0^3, r_0^2 r_L, r_0, r_L^2, r_L^3.$$

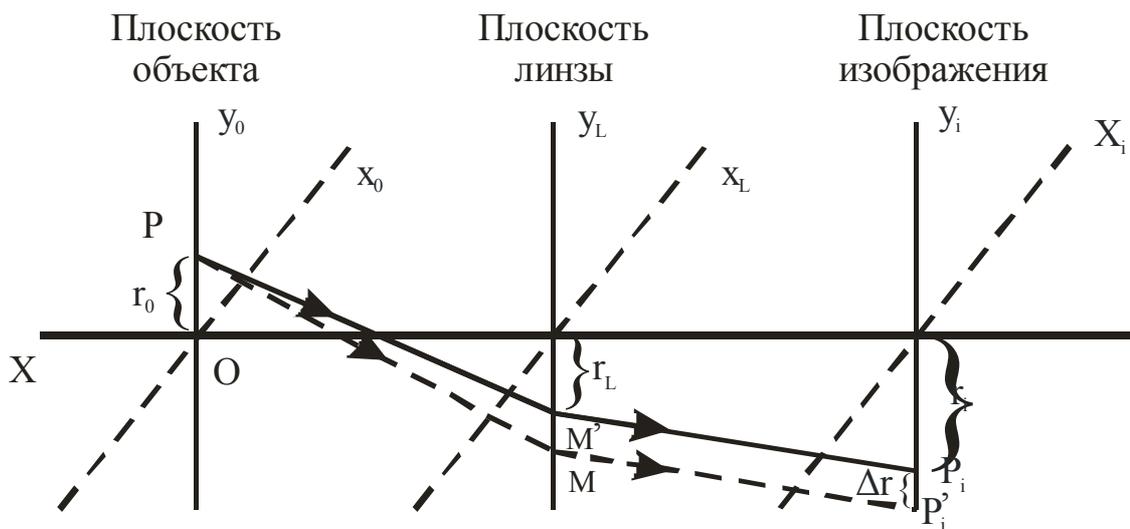


Рисунок 2.3 – Ход лучей в соединительном устройстве, построенном на микролинзах

Если r_0 и r_L малы, то $r_i = r'_i$ и, следовательно, разность Δr_i не должна зависеть от первой степени r_0 и r_L .

Благодаря цилиндрической симметрии обычных систем линз aberrация не зависит от членов четного порядка. Следовательно, aberrация зависит только от членов третьего порядка. Таким образом, можно написать $\Delta r_i \rightarrow r_0^3, r_0^2, r_L, r_0, r_L^2, r_L^3$.

Каждый член при этом связан с отклонением точки изображения от параксиальной p_i . В оптике такие отклонения классифицируются как ошибки изображения: дисторсия (первый член), кривизна поля и астигматизм (второй член), кома (третий член), сферическая aberrация (четвертый член).

Конечный поперечный размер объекта (ОВ) и расходящийся световой пучок могут быть рассмотрены с других позиций. При этом из-за конечного поперечного размера объекта (ОВ) – АВ расходящийся из каждой точки на торце ОВ световой пучок 2α , отличный от параксиального, эквивалентен продольному расположению источников света вдоль главной оси оптической системы, что аналогично "размазыванию" источников света вдоль оси на отрезке СД (рис. 2.4).

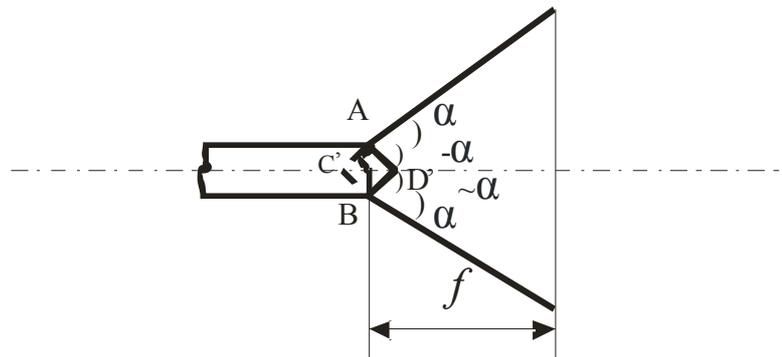


Рисунок 2.4 – Представление волокна как оптической системы с мнимым и действительным изображением

При такой трактовке часть источников света расположена между фокусом линзы и оптической системой и дает мнимое изображение, а часть источников света расположена за фокусом линзы и создает действительное изображение.

Сложность задачи состоит в том, что надо сфокусировать расходящийся световой пучок диаметром 50 мкм и одновременно удовлетворить условиям дальнейшего прохождения сигнала по ОВ без потерь. Это означает, что максимальный угол, с которым световой пучок поступает в выходное ОВ, должен быть не более чем значение $\arcsin(NA)$.

Таким образом, задача заключается в том, чтобы лучи, поступающие в

выходное ОВ, не выходили за пределы радиуса световедущей жилы $r = 25$ мкм, и максимальный угол входа луча в выходе ОВ не превышал угол, определяемый числовой апертурой ОВ.

Если диаметр светового пучка при входе в выходное ОВ превышает диаметр сердцевины ОВ, будут оптические потери по пятну, а при превышении максимального угла входа луча в выходное ОВ значения $\arcsin(NA)$ – будут потери по углу. Фактически имеют место оба вида потерь.

При выбранном радиусе линзы R и показателе преломления n материала, из которого изготовлены линзы, имеют два параметра l и d , варьируя которые можно уменьшить ошибки изображения, вносимые оптической системой. Максимальные ошибки изображения определяются точками максимального удаления границы объекта (торца ОВ), точнее точек AA от главной оптической оси ($OA=r_{ОВ}=25$ мкм), и максимальным углом расходимости светового пучка-луча 1 («верхний») луч с углом $\alpha_0=\arcsin(NA)$, В силу симметрии ОВ и оптической системы достаточно рассмотреть лучи из точки A (рис. 2.1).

Рассмотрим оптическую систему с параметрами, выбранными оптимальными с точки зрения парааксиального светового пучка и точечного источника света, при прослеживании хода лучей 1 и 2 в этой оптической системе получены точки B_1 и B_2 пересечения лучей 1 и 2 с плоскостью, проходящей через торец выходного ОВ. Как показано на рис. 2.1 "верхний" луч входит в ОВ ($BO_i < r_{ОВ}$), в то время как "нижний" луч пересекает плоскость торца ОВ за пределами ОВ ($OB_2 > r_{ОВ}$) – Отсюда видно, что максимальный размер светового пятна в плоскости торца выходного ОВ определяет величина OB_2 , что обуславливает оптические потери по пятну.

При сдвиге торца входного ОВ вдоль главной оси оптической системы к входной линзе (в силу симметрии горца выходного ОВ к выходной линзе) расстояние OB_2 уменьшается на графике UB_2 , а расстояние OB_1 увеличивается на графике EB_1 .

Используя эту тенденцию, можно добиться при определении n и R выполнения следующих условий: $OB_1 \leq r_{ОВ}$, $OB_2 \leq r_{ОВ}$. Оба луча ("верхний" и "нижний") находятся в пределах сердцевины и диаметр светового пятна на торце выходного ОВ не будет превышать диаметр этой сердцевины (рис. 2.5). Однако не при всех n и R можно добиться условия, чтобы диаметр светового пятна на торце выходного ОВ не превышал диаметр сердцевины, поэтому не при всех n и R можно найти то значение Δx (сдвига торца ОВ от оптимальных параметров с точки зрения парааксиальности светового пучка и точечного источника света), при котором оба луча находятся в пределах сердцевины (рис. 2.5).

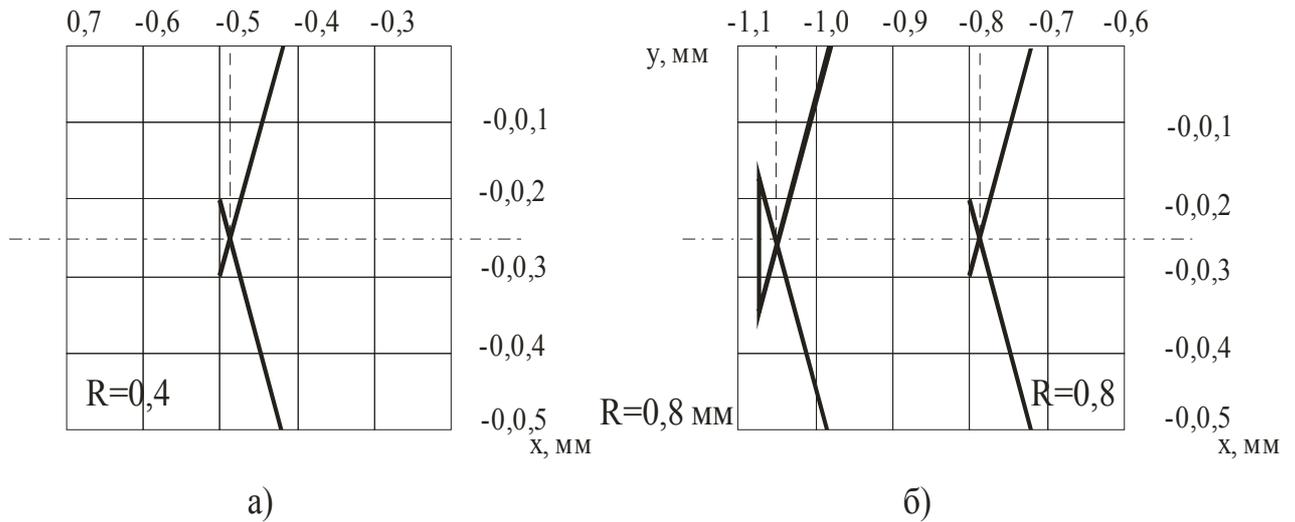


Рисунок 2.5 – Ход верхнего и нижнего лучей, при которых световое пятно не превышает сердцевину при радиусах линзы 0,4 мм (а), 0,6 и 0,8 мм (б)

При других n и R с изменением Δx расстояние OB_1 возрастает и при определенном Δx равно r_{OB} , в то время как расстояние OB_2 уменьшается, оставаясь больше, чем r_{OB} . Для этих значений n и R следует ожидать оптические потери по пятну, отличные от нуля (рис.к 2.5).

На рис. 2.6 – 2.8 приведены результаты исследований для $n = 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9$ и $R=400; 600; 800; 1000$ мкм.

Таким образом, видно, что изменением параметра l можно свести оптические потери, по пятну к минимуму, а при некоторых значениях n и R – к нулю.

Оптические потери по углу изменяются незначительно (рис. 2.7). Их можно скомпенсировать варьированием расстоянием между входной и выходной линзами.

При варьировании расстояния между OB и соответствующей линзой оптические потери по углу изменяются незначительно (рис. 2.7, 2.8).

При прослеживании "верхнего" 1 и "нижнего" 2 лучей, оказывается, что потери по углу в условиях $d=2f$ имеют место за счет нижнего луча 2. Угол входа нижнего луча в выходное OB превышает значение $\arcsin(NA)$. Угол входа верхнего луча 1 в выходное OB находится в пределах значения NA . Далее под углом входа луча в OB будем подразумевать абсолютное значение. При прослеживании лучей 1 и 2 в условиях оптимальных потерь по пятну ($l = f - \Delta x$ зафиксировано), оказывается, что с уменьшением d (исходное значение $d=2f$) угол входа верхнего луча 1 в выходное OB увеличивается, в то время как угол входа нижнего луча 2 в выходное OB уменьшается (рис. 2.8. 2.9).

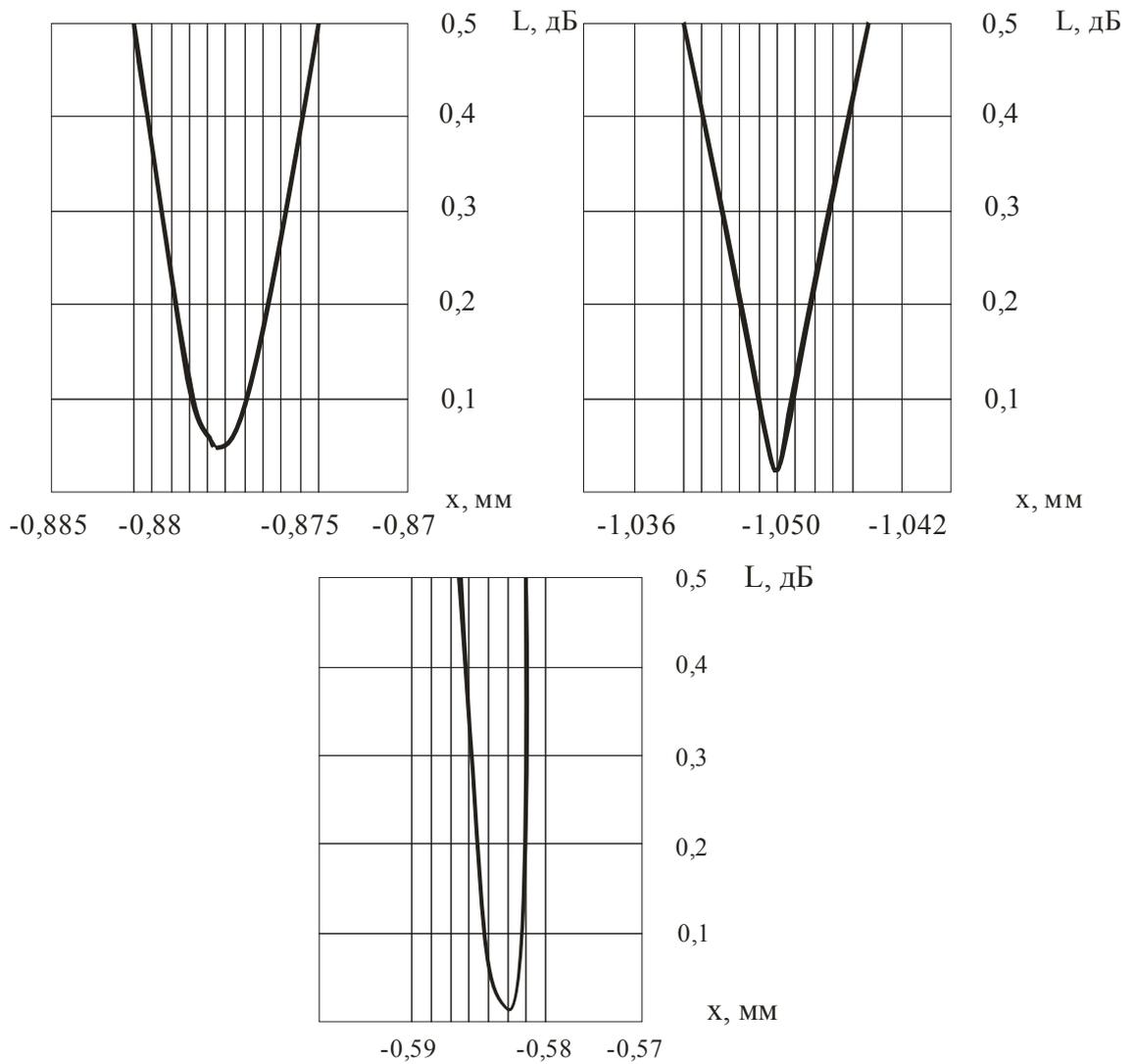


Рисунок 2.6 – Зависимость оптических потерь по пятну от смещения торца входного ОВ от центра входной линзы для $R = 0,4$ мм, $n = 1,5$, $NA = 0,2$

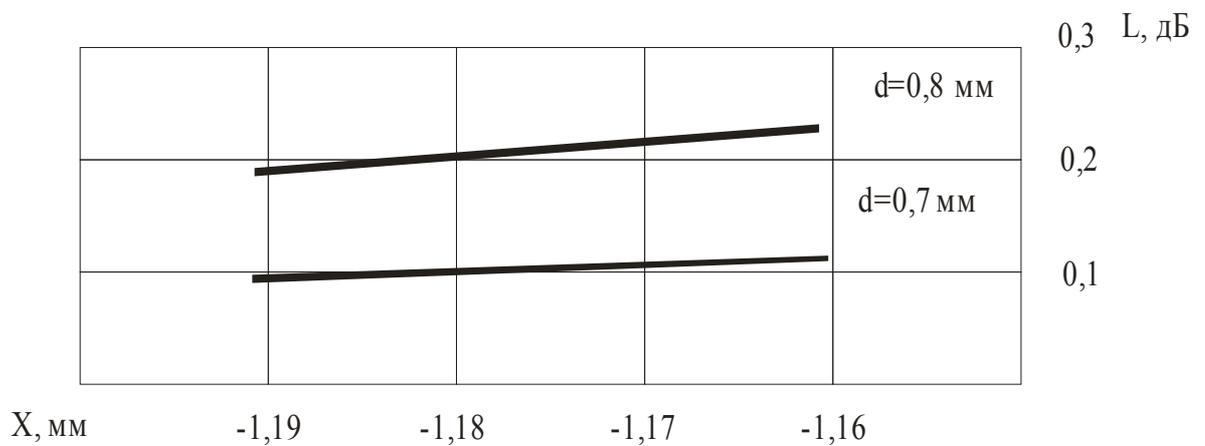


Рисунок 2.7 – Зависимость оптических потерь по углу от смещения при различных расстояниях между линзами

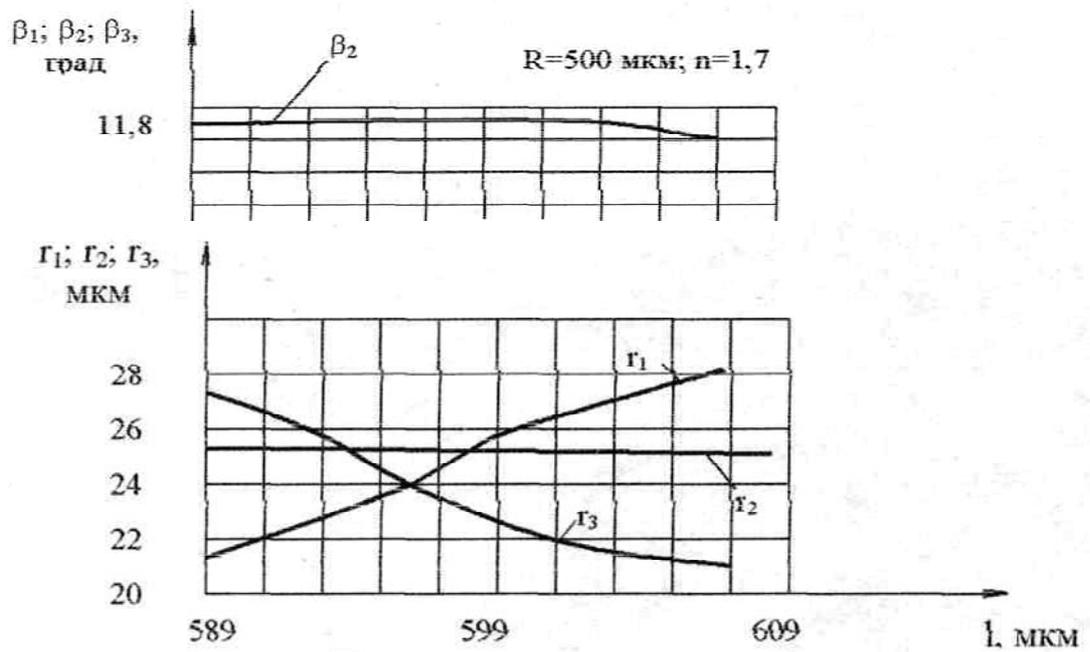


Рисунок 2.8 – Зависимость углов входа лучей в выходное ОВ и радиусов светового пятна в плоскости торца выходного ОВ от расстояния между торцом входного ОВ и центром входной линзы

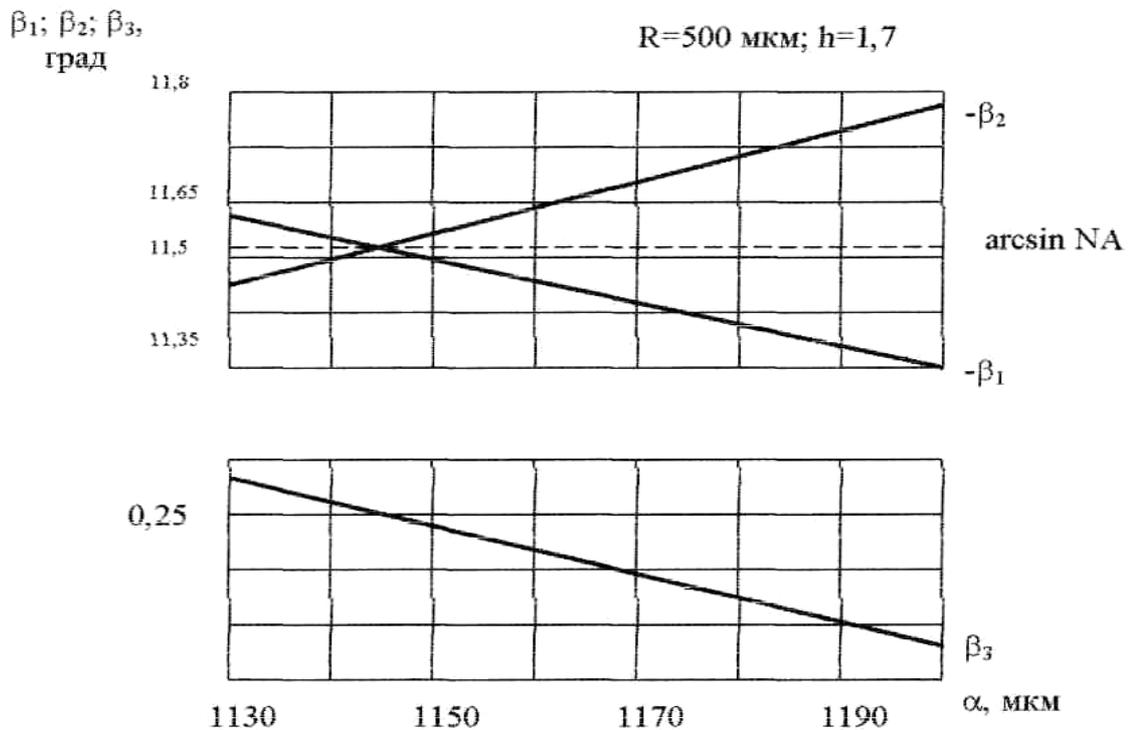


Рисунок 2.9 – Зависимость углов входа лучей в выходное ОВ и радиусов светового пятна в плоскости торца выходного ОВ от расстояния между центрами входной и выходной линз

При некотором значении $d = d_0$ эти кривые пересекутся. При этом значении параметра $d = d_0$ углы входа нижнего и верхнего лучей в выходное ОВ равны. Это соответствует минимальному отклонению одновременно верхнего и нижнего лучей от угла, определяемого числовой апертурой ОВ ($\arcsin(NA)$), Следовательно, при этих значениях параметра $d=d_0$ оптические потери по углу минимальны.

Оптические потери по углу при варьировании параметра d (в условиях оптимального 1) практически не изменяются (рис. 2.8. 2.9). При определенных значениях параметров πR можно найти такое расстояние между линзами, при котором углы входа верхнего и нижнего лучей одновременно меньше или равны углу, определяемого числовой апертурой ОВ. При этом оптические потери по углу равны нулю (рис. 2.9).

Оптические потери рассматриваемой системы представляют собой совокупность потери по углу и по пятну. Как показано выше, оптические потери по пятну можно скомпенсировать изменением параметра l (исходное значение $l = f$). При этом оптические потери по углу практически не изменяются (рис. 2.7, 2.8). Аналогично оптические потери по углу можно компенсировать изменением параметра d (исходное значение $d = 2f$). При этом оптические потери по углу практически не изменяются (рис. 2.9)

Таким образом, видно, что варьируя независимо от другого параметра l и d , можно свести к минимуму общие потери в рассматриваемой оптической системе. Такие минимальные потери можно получить для оптической системы со сферическими линзами радиуса R с однородным распределением профиля показателя преломления n . Зависимость оптических потерь от радиуса линзы при постоянном показателе преломления n приведены на рис. 2.10.

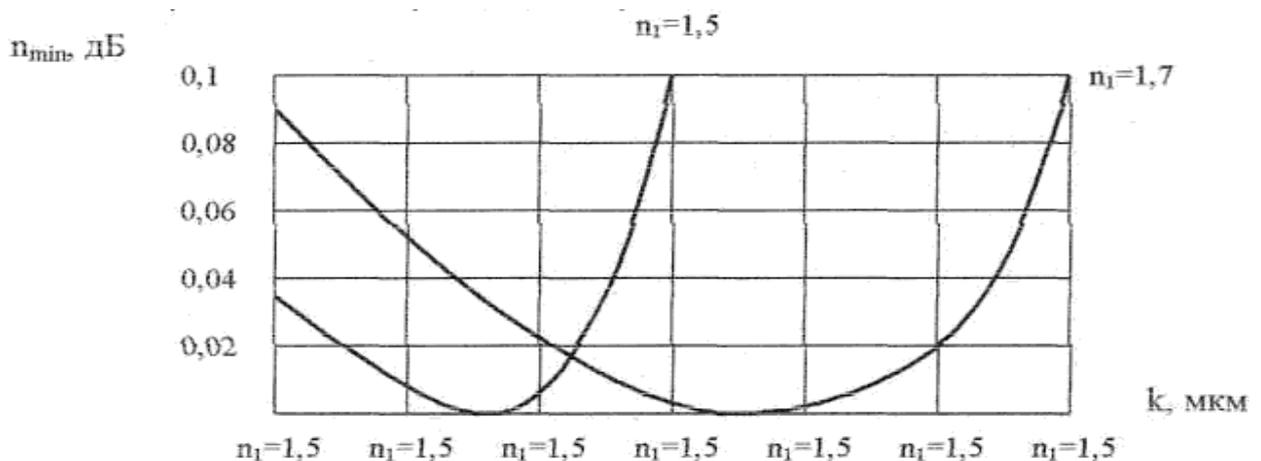


Рисунок 2.10 – Зависимость потерь от радиуса линзы при различных показателях преломления

Оказывается, что при заданном n существуют значения параметра R , при которых оптические потери равны нулю. Так, например, для $n = 1,5$ оптические потери отсутствуют при радиусе линзы $R = 380$ мкм, а для $n = 1,7$ – при $R = 550$ мкм.

При отклонении от вышеуказанных значений R при заданных n оптические потери возрастают. При значениях R в интервале $100 - 500$ мкм ($n = 1,5$) и в интервале $200 - 800$ мкм ($n = 1,7$) оптические потери для рассматриваемой оптической системы не превышают $0,1$ дБ.

Рассмотрим некоторые закономерности параметров светового луча в пространстве между выходной и входной линзами в условиях минимальных оптических потерь, что соответствует оптимальным значениям l и d .

При фиксированном радиусе линзы R и числовой апертуре $OB - NA$ с ростом показателя преломления радиус светового пучка в пространстве между линзами уменьшается (рис. 2.11), а абсолютная величина угла выхода луча из входной линзы (или расходимость светового пучка) увеличивается (рис. 2.12).

С другой стороны: при фиксированном показателе преломления линзы n и числовой апертуре $OB - NA$ с ростом радиуса линзы радиус светового пучка в пространстве увеличивается (рис. 2.13), а расходимость светового пучка уменьшается (рис. 2.14).

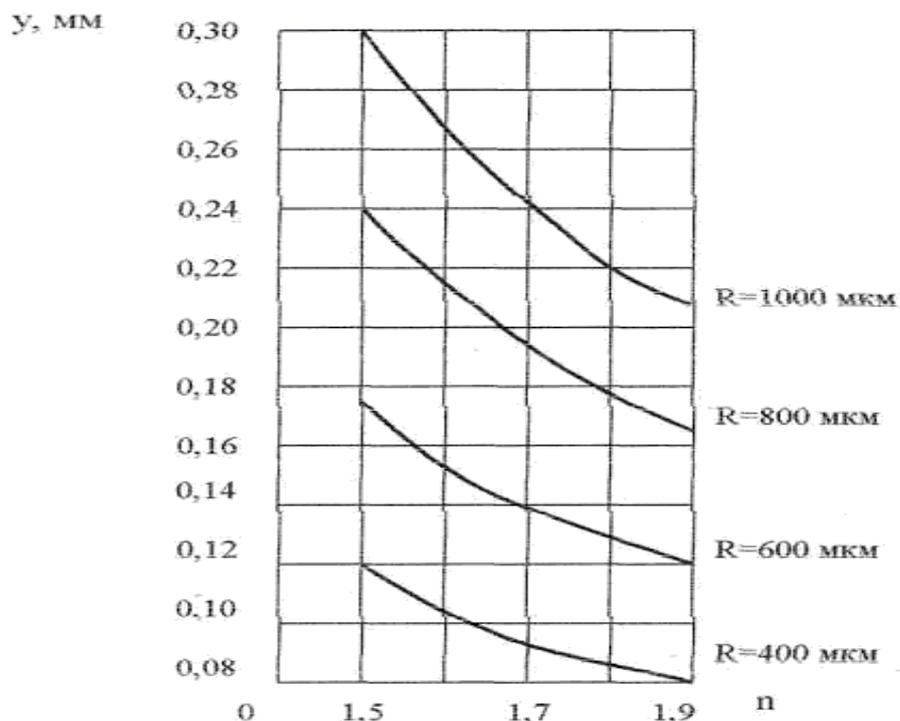


Рисунок 2.11 – Зависимость радиуса светового пятна от показателя преломления при различных радиусах линз

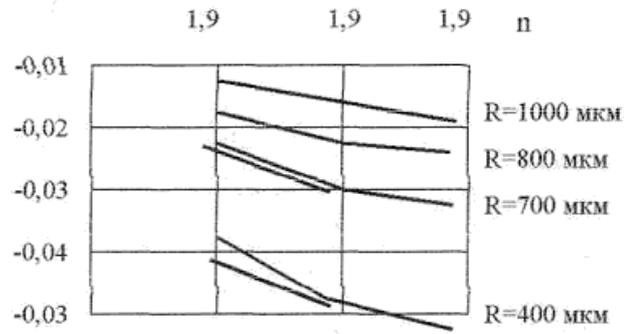


Рисунок 2.12 – Зависимость угла расходимости светового пучка от показателя преломления для линз с различными радиусами

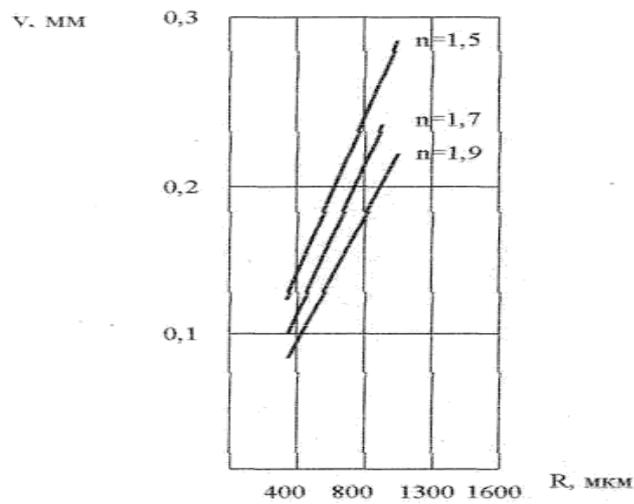


Рисунок 2.13 – Зависимость радиуса светового пятна от радиуса линзы при фиксированном показателе

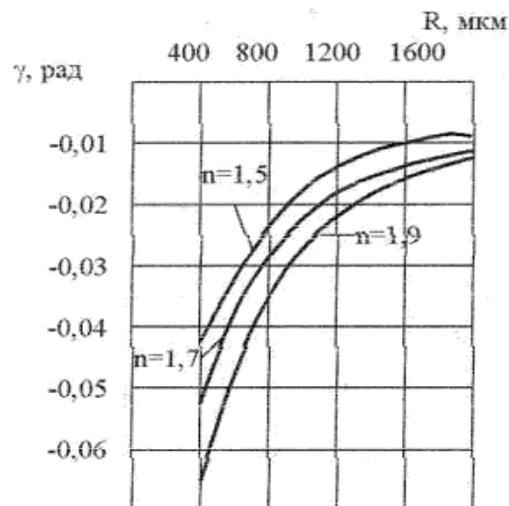


Рисунок 2.14 – Зависимость угла расходимости светового пучка в плоскости коммутации от радиуса линзы при различных показателях преломления

При радиусе линзы $R = 10$ мм расходимость пучка в пространстве между линзами лежит от 0,018 радиан ($n = 1,5$) до 0,021 радиан ($n = 1,9$).

Следовательно, для устойчивости оптической системы с минимальными потерями при соединении необходимы сферические линзы с большим радиусом ($R = 1000$ мкм) и малым показателем преломления ($n = 1,6$). Как было показано выше, сферические линзы с однородным показателем преломления более просты в изготовлении, обладают сферической симметрией, что упрощает монтаж, и имеют относительно небольшую оптическую толщину, положительно влияющую на устойчивость оптической системы. Это делает применение сферических линз наиболее желательным. Поэтому принято решение построить оптическую систему в первую очередь на их основе.

Расчетным путем из условий оптической расходимости пучка и минимальных потерь за счет различных аберраций определены:

- радиус линзы $R = 400$ мкм для стекла с показателем преломления $n = 1,5$;
- расстояние торец волокна – поверхность линзы $l = 182$ мкм (из условия минимальных потерь по пятну);
- расстояние между поверхностями линз в системе соединения $d = 300$ мкм (из условий минимальных потерь по углу) .

К конструкции наконечника ОВ, оснащенного сферической линзой, предъявлены следующие требования:

- стеклянная сфера радиусом $R = 400$ мкм должна быть закреплена на торце наконечника ОВ на расстоянии торец-ОВ-поверхность шара, равном 182 мкм, при совпадении оси волокна с центром шара;
- размер линзовой оправы должен быть таким, чтобы контуры оправы или крепящих ее деталей не превышали размеров наконечника ОВ, имеющего диаметр 2,5 мм. Если этого не удастся достичь, то максимальный размер диаметра наконечника не должен превышать 3,8 мм;
- в креплении микролинзы должна быть предусмотрена возможность юстировки для точного совмещения оси волокна с центром шара, либо перед закреплением линзы в оправе на наконечнике, либо в процессе эксплуатации (в последнем случае узел юстировки одновременно является креплением линзы на наконечнике).

Исходя из этих требований, разработано несколько вариантов линзового модуля (линза в оправе) [30].

Оправа-шайба. В этой конструкции оправа выполнена в форме шайбы, показанной на рис. 2.15 – 2.17.

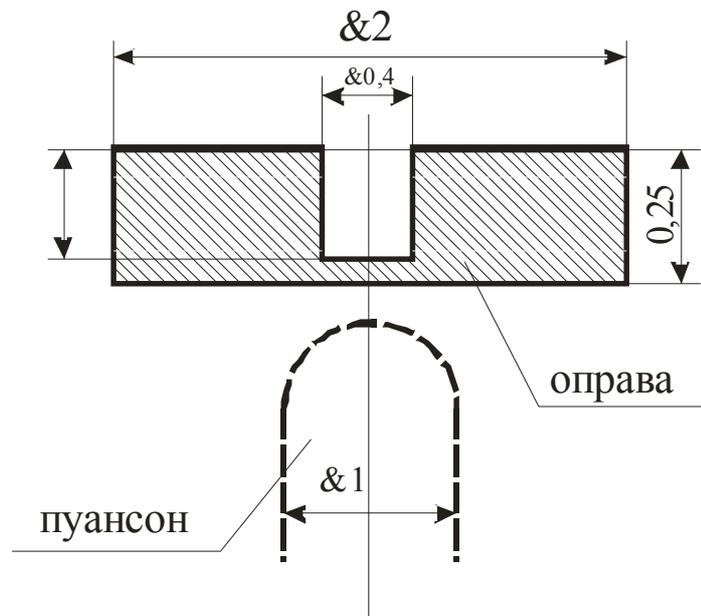


Рисунок 2.15 – Шайба для соединительного устройства, построенного на микролинзах [30]

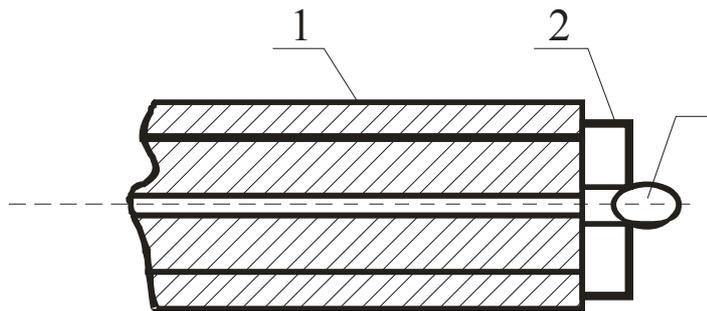


Рисунок 2.16 – Наконечник с шайбой 1 и микролинзой 2

Рабочие поверхности
линзы

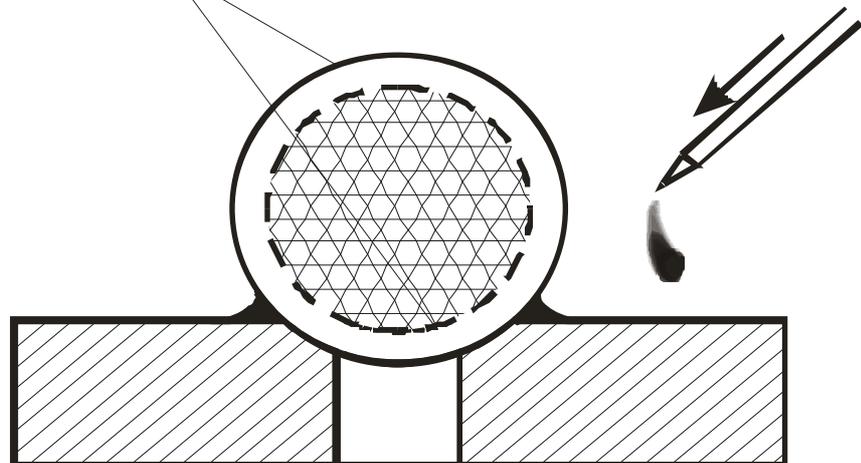


Рисунок 2.17 – Приклеивание микролинзы к оправе

Размеры шайбы не превышают диаметр наконечника ОВ, который равен 2,5 мм, и допускают, возможность радиальной и осевой юстировки. Последняя обеспечивается "запасом" толщины шайбы (0,25 мм), которая выбрана с учетом одновременного выполнения гнезда под линзу и получения размера l с малой погрешностью (± 1 мкм) методом холодного прессования. Центральный канал полностью пропускает световое пятно, диаметр которого на линзе не менее 150 мкм. Шайба выполнена из ферромагнитного металла (имеющего возможность намагничивания) для облегчения юстировки линзы. На рис. 2.16 показан наконечник ОВ – линза в оправе, состоящий из собственно наконечника L , оправы 2, микролинзы 3 и собирающийся в следующем порядке:

- отбор сферических микролинз на отсутствие видимых дефектов снаружи (царапины, сколы и пр.), внутри (включения размером более 30 мкм) и на размер шара $R = 400$ мкм ± 5 мкм с помощью оптического микроскопа, имеющего увеличение 100...200 раз;

- приклеивание линзы к оправе эпоксидной смолой или клеем при горизонтальном положении оправы под микроскопом (рис. 2.17), Основное внимание при выполнении этой операции требуется при дозировке капельки клея, которая подносится на кончике иглы к микролинзе. Количество клея или смолы должно быть достаточным, чтобы обеспечить прочность соединения, удержание клея в узкой конической плоскости силами поверхностного натяжения и исключение затекания клея на рабочие поверхности микролинзы;

- установка оправы на торец наконечника и радиальная юстировка ее по ОВ. Юстировка состоит в поперечных перемещениях оправы по торцу наконечника и выборе положения, соответствующего коаксиальности световых пятен от двух пучков (рис. 2.18): лазер-волокно-экран и лазер-волокно-линза-экран. На экране нанесена координатная сетка. Оправа на торце наконечника при юстировке удерживается за счет магнитного притяжения;

- приклеивание оправы к торцу наконечника производится после окончания юстировки.

Измерение потерь в такой системе, а также проверка прочности клеевого соединения модуль-наконечник выявили следующие недостатки:

- имеется возможность затекания клея или эпоксидной смолы на торец ОВ или на поверхность сферы, обращенную к торцу волокна, что увеличивает неконтролируемые потери;

- прочность клеевого соединения не обеспечивает надежное крепление линзы в оправе и модуля на торце наконечника;

- микролинза оказывается обращенной наружу и незащищенной от

ударов, контактов с твердыми поверхностями.

От этих недостатков свободен "безклеевой" вариант линзового модуля [30].

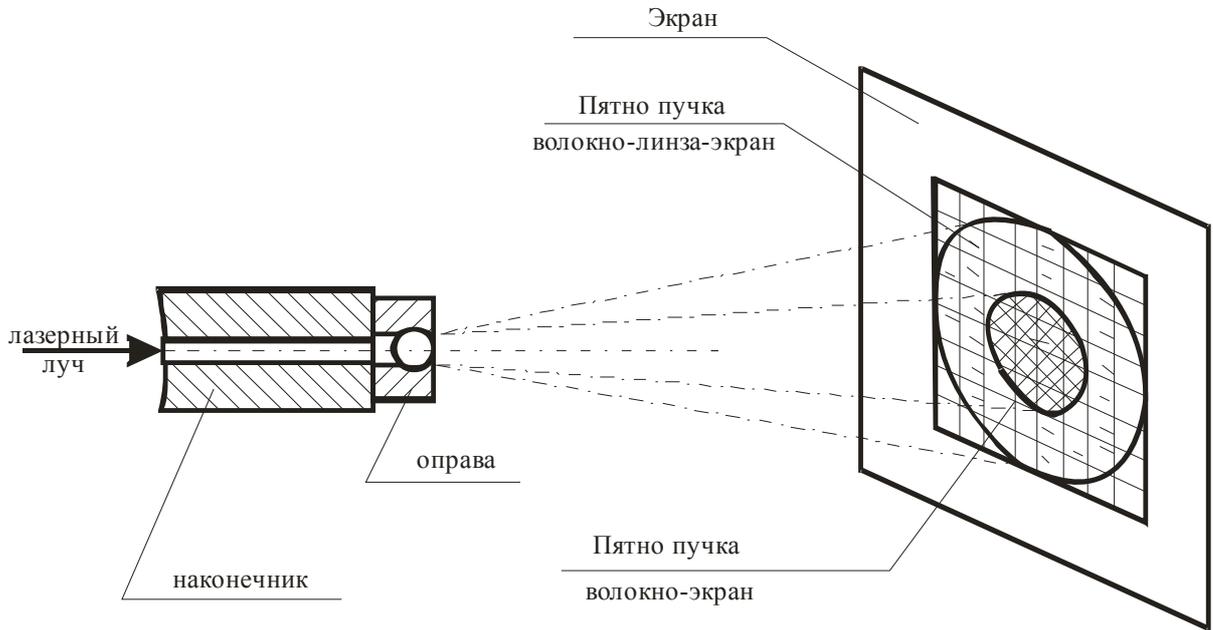


Рисунок 2.18 – Юстировка соединительного устройства с линзой

На рис. 2.19 показана конструкция "безклеевой" механического крепления микролинзы к наконечнику, линза 4 находится в двойной оправе, состоящей из шайбы 3 и гильзы 2, надетой на наконечник ОВ 1. В данной конструкции шайба 3 выполняет ту же функцию, как и в первом варианте, фиксируя поверхность шара на расстоянии от торца волокна. Но она является "плавающей". Ось ОВ с центром шара совмещается с помощью гильзы 2.

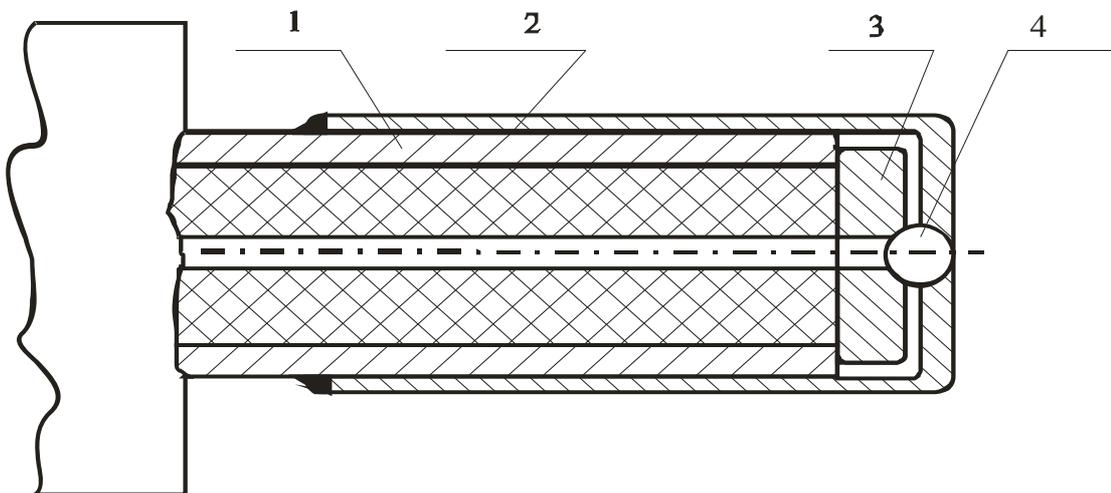


Рисунок 2.19 – Безклеевое соединительное устройство с микролинзой [30]

Технология изготовления гильзы 2 включает в себя операцию одновременного сверления комбинированным инструментом гнезда, центрирующего микролинзу с шайбой, и внутренней цилиндрической поверхности гильзы диаметром $2,5 - 0,004$ мм. Юстировка и приклеивание исключаются. Центровка микролинзы относительно оси волокна является жесткой и осуществляется за счет плотной посадки гильзы на наконечник, наружная поверхность которого предварительно уже отъюстирована относительно оси световолокна.

Измеренные оптические, потери в данной системе волокно-линза показаны табл. 2.1 для микролинзы с $n = 1,5$; $K = 0,8$ мм, $l = 0,2$ мм.

Таблица 2.1 – Результаты измерений относительных оптических потерь в "безклеевом" варианте построения линзового модуля для многомодового ступенчатого ОВ (диаметр сердцевины 50 ± 2 мкм) при $\lambda = 1,3$ мкм

| № Варианта | 3 | 10 | 11 | 19 | 34 | 35 |
|--------------------------------------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| Относительные единицы мощности P_0 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| Относительные единицы мощности P_x | 9 | 9,5 | 12,2 | 8,2 | 10,3 | 9,5 |
| Потери N , дБ. | 5,5 | 5,3 | 4,2 | 5,9 | 4,9 | 5,3 |

P_0 – оптическая мощность на входе из наконечника без модуля;

P_x – оптическая мощность на выходе из наконечника, оснащенного модулем;

$$N = \lg \frac{P_0}{P_x}, \quad [\text{дБ}].$$

Микролинза в данной конструкции защищена от внешних воздействий, не нужны клеи и эпоксидные смолы, и отпадают связанные с этим потери от затекания их на торец волокна и поверхность микролинзы. С другой стороны, качество жесткой юстировки в этой конструкции полностью зависит от точности изготовления линзы, соосности гнезда и внутренней цилиндрической поверхности гильзы, а также соосности посадочной поверхности ВОК диаметром $2,5$ мм и оси ОВ.

Полученные в данной конструкции потери оказываются недопустимо высокими. Однако указать их точную причину (френелевские потери при переходе границ раздела, поглощение в материале линзы или несовпадение оси волокна и центра шара) невозможно из-за непрямого юстирования линзы по

ОВ. Кроме того, передача усилий на "плавающую" оправу через контакт гильзы с микролинзой нежелательна, так как при этом не исключается возможность повреждения последней.

Оправа типа "гнездо". Рассмотрение как положительных, так и отрицательных сторон предыдущих вариантов показывает, что необходимо сочетать в конструкции модуля точность установки микролинзы как по оси ОВ так и относительно его торца. Этого можно достичь, если "плавающая" оправка будет закреплена на торце наконечника ОВ, после юстировки ее по оси ОВ. Если разделить и сделать независимыми друг от друга операции крепления оправы на торце и крепления микролинзы в оправе и, наконец, если отказаться от склеивания и перейти к механическому креплению как оправы на торце, так и микролинз в оправе.

Такие требования удастся одновременно удовлетворить в оправе типа "гнездо", показанной на рис. 2.20. Оправка представляет собой шайбу диаметром 2,3 мм и толщиной 1,13 мм, с каналом по центру для прохода светового пучка и гнездом для микролинзы, которая фиксируется в нем стопорным разрезным пружинным кольцом. Расстояние $l = 0,182$ мм между линзой и торцом волокна по технологии холодного "допрессования" шарового гнезда обеспечивается с допусками $\pm 0,002$ мм. Сферическая линза диаметром $0,800 \pm 0,005$ мм свободно помещается в гнездо диаметром $0,9 \pm 0,02$ мм и жестко фиксируется в нем постоянным усилием трения пружинного кольца в стенке гнезда.

Таким образом, линза оказывается закрытой в оправе, защищенной со всех сторон, и открытой только по двум цилиндрическим каналам вдоль оси оправы для входа светового пучка диаметром до 0,5 мм и выхода диаметром до 0,4 мм. Появляется возможность юстирования микролинзы в оправе относительно оси ОВ с последующим креплением модуля на торце наконечника ОВ точечной сваркой.

Кроме отмеченного преимущества такая конструкция позволяет осуществить в будущем снижение френелевских потерь на поверхностях перехода из одной среды в другую методами "просветления оптики" или иммерсии, дополнительной возможностью такого модуля является, также компенсация "воздушной линзы".

Существующая технология обработки торца наконечника ОВ предусматривает полировку торца до чистоты поверхности класса 10. При этом одновременно полируется металлический корпус наконечника (трубка диаметром $2,5 \times 1,4$ мм из закаленной стали 40×13) и световодная часть (ОВ и центрирующие полости между ними). Разная прочность и сопротивляемость истиранию корпуса и световодной части наконечника является причиной не-

плоскостности торца и появления на нем полусферической выемки. Высота воздушного сегмента, если считать его форму сферической, колеблется в пределах 10 - 2 мкм. Если оценить размер AC как 20 - 4 мкм, то при апертуре OB , равного 0,22, диаметр светового пятна составит 56 – 60 мкм при диаметре приемного волокна $CD = 50$ мкм. Оптические потери по пятну при этом могут достигать 1,2 ÷ 1,6 дБ даже при идеальном совпадении осей стыкуемых OB .

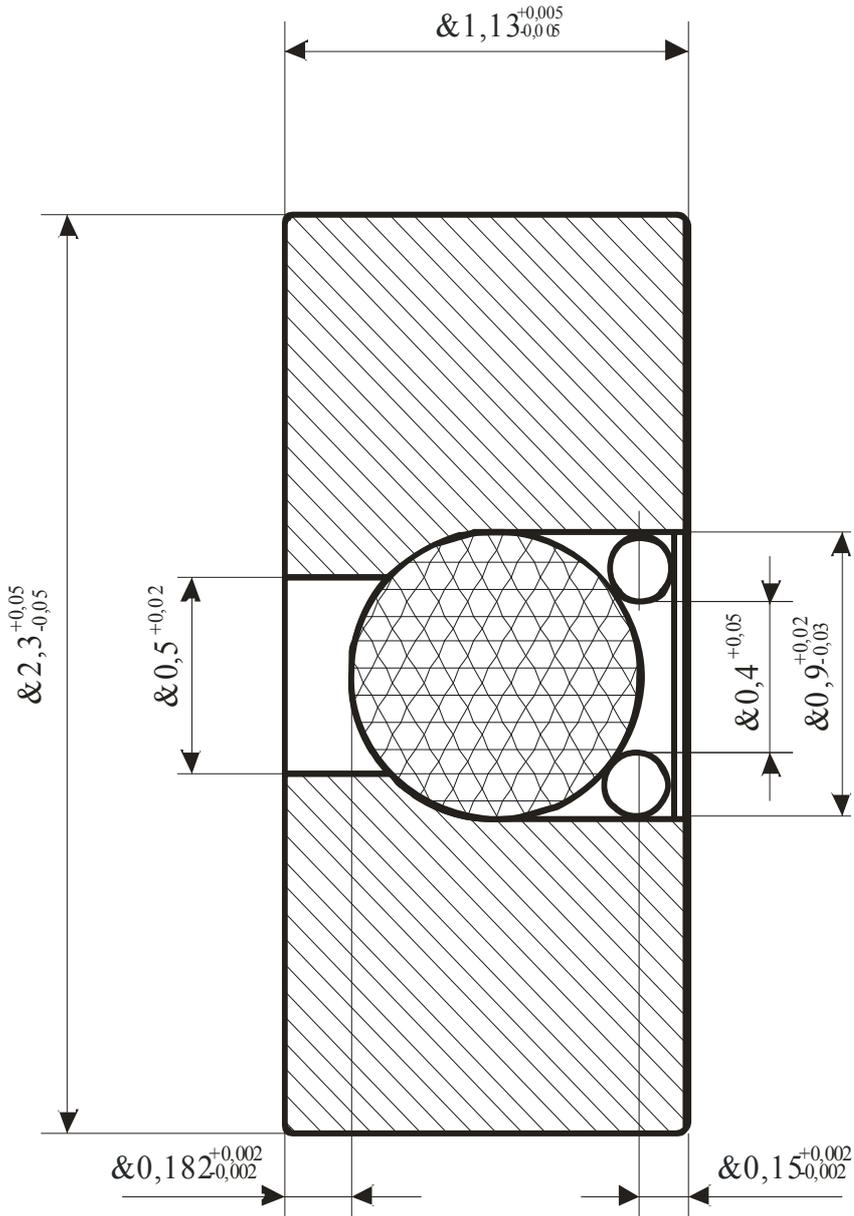


Рисунок 2.20 – Оправа микролинзы типа "гнездо"

Поскольку в линзовом модуле с оправой типов "гнездо" и "шайба" расчет размера l построен из условия минимальных потерь по пятну, появляется возможность скорректировать его и устранить или значительно снизить по-

тери в соединителе, используя линзовый модуль с "воздушной" линзой.

Технологический процесс изготовления линзового модуля предусматривает высокую точность размеров l и H .

Расстояние l между нижним торцом шайбы и поверхностью сферы, соответствующее минимуму оптических потерь по пятну, не должно выходить за пределы допуска ± 2 мкм. При этом потери по расчету не превышают 0,2 дБ.

Высота шайбы H должна иметь точность, обеспечивающую оптимальную дистанцию между двумя сферическими микролинзами в стыке с наконечником ОВ, оснащенными линзовыми модулями. Полную компенсацию потерь по углу обеспечивает расстояние между линзами 300 ± 10 мкм. Указанное расстояние с допуском проще всего обеспечить упором двух оправ друг в друга верхними торцами. Допуск на высоту шайбы H при этом равен ± 5 мкм. В этом случае потери по расчету не превышают 0,05 дБ.

Шайба помещается на стол прессы так, чтобы в отверстие стола входил шуп индикатора. Предварительно фиксируется показание индикатора при упоре в нижний торец шайбы, а затем поверхность стального шарика диаметром 0,8 мм. на который давит пуансон. Такая операция обеспечивает допуск на размер d , равный ± 2 мкм. Схема может быть использована не только в режиме изготовления гнезда, но и в режиме контроля модуля после установки в гнездо микролинзы и закрепления ее пружины кольцом.

Высота шайбы H с допуском ± 5 мкм может быть обеспечена обработкой верхнего ее торца на плоскошлифовальном станке и последующей допрессовкой гнезда.

Конструкция наконечника ОВ, оснащенного сферической микролинзой в оправе типа "гнездо", показана на рис. 2.20. Она состоит из следующих деталей: 1 – оправы микролинзы; 2 – микролинза; 3 – стопорное пружинное кольцо.

После юстировки по ОВ оправы микролинзы приваривается точечной лазерной сваркой к торцу наконечника. Наконечник, оснащенный микролинзой, может без каких-либо дополнительных изменений быть использован в штатном разъеме типа "гнездо".

2.3 Минимизация потерь в соединительном устройстве одномодовых и многомодовых волокон с помощью самоюстировки ОВ

Рассмотренное конструктивно-технологическое решение, использующее стыковку концов ОВ, вклеенных в наконечники внутри общей для них втулки, является решением преобразующего типа. Точность совмещения

обеспечивается в этом случае чрезвычайно сложной подгонкой, компенсирующей технологически неустранимую неточность вклеивания конца волокна.

Соединительное устройство, построенное на микролинзах, описанное в п. 2.2, не в состоянии обеспечить стыковку одномодовых волокон. Это обусловлено двумя обстоятельствами. Первое из них имеет конструктивное происхождение. Оно связано с искажением моды в световом пучке, вышедшем из плотной среды в вакуум (или воздух). Второе обстоятельство имеет технологическое происхождение и связано со значительными трудностями изготовления совершенно симметричных радиально и азимутально-сферических линз по их геометрическим размерам и показателю преломления.

Поэтому при стыковке одномодовых волокон следует использовать конструктивно-технологические решения второго типа – с управляющими конструктивными и технологическими воздействиями, реализуемыми при изготовлении и эксплуатации соединительного устройства.

Одним из подобных конструктивных принципов такого типа является самоюстировка волокон непосредственно в процессе микросборки.

В данной работе выбрана сухая микросборка, которая реализуется без введения между стыкуемыми волокнами плотной жидкой среды с показателем преломления, близким к показателю преломления волокна. Введение подобной среды является обязательным условием только в случае построения подводных соединительных устройств, в которых заполнение внутренних полостей подобной жидкой средой, находящейся под тем же давлением, что и окружающая морская вода, предотвращает проникновение морской воды внутрь соединительного устройства.

Если же соединительное устройство предназначено для работы на суше, то заполнение его подобной средой (например, силиконовым маслом) нежелательно, т.к. требует сложной системы диафрагм, препятствующих вытеканию масла в разъединенном состоянии. Малейшее просачивание масла, на поверхности, соприкасающиеся при стыковке, служит причиной накопления в таких местах пыли и других загрязняющих соединении компонентов. В основу сухой микросборки положен принцип юстировки стыкуемых волокон. Продольная юстировка (сведение двух концов волокон встык торцами без зазора) осуществлялась с использованием конических ловителей волокна, изготавливаемых в виде единой детали с зажимами концов волокна; движение конца волокна в стыковочный канал и сближение его на заданное малое расстояние с торцом второго конца волокна контролируется ограничителем, зафиксированным клеем и опрессовкой на заданном расстоянии от торца первого волокна.

Если материал зажимов обладает более низким модулем упругости, чем волокна, то при переходе волокна из ловителя в цилиндрическую канавку последующее симметричное относительно оси стыкуемых волокон сжатие зажимов из значительно более эластичного и податливого, чем у волокон материала, самоцентрирует два цилиндрических симметричных жестких тела в радиально симметричной упруго нагруженной среде. Минимум потенциальной энергии названной системы соответствует расположению концов обоих волокон на одной оси, даже если они имеют заметно различающиеся диаметры.

Основной задачей при выборе материала является минимизация модуля упругости при предотвращении в то же время состругивания стружки острым краем торца волокна при его движении в ловителе. Наличие стружки не допускается. Она, попав в зазор между стыкуемыми волокнами, препятствует распространению света.

Как известно, прочность на срез и модуль упругости взаимосвязаны: со снижением модуля упругости уменьшается прочность на срез, тем самым увеличивается вероятность снятия стружки.

Альтернативой является уменьшение коэффициента сухого трения материала. В сочетании с конструктивным уменьшением угла состругивания (угла между траекторией движения края торца волокна в ловителе и между образующей ловителя) это может обеспечить такое снижение усилия зацепления, что край торца при движении проскальзывает по образующей ловителя, не снимая стружки.

Из сказанного следует, что эффект юстировки может быть обеспечен лишь при построении зажимов из высокополимерных органических материалов.

Первые конструктивные решения, основанные на самоюстировке ОВ, применявшие клиновидные желоба в стыковочном устройстве, дают возможность выровнять оси сердцевин стыкуемых концов ОВ в вертикальной плоскости, в случае, если диаметры их оболочек равны между собой. Однако диаметр оболочки волокна имеет допуск, равный ± 5 мкм, при этом максимальный диаметр $D_{\text{макс.}} = 130$ мкм, а минимальный $D_{\text{мин.}} = 120$ мкм. Отсюда следует, что один торец стыкуемого волокна в стыковочном клиновидном желобе может оказаться смещенным относительно другого не более, чем на 10 мкм, что недопустимо для одномодового волокна, у которого диаметр световедущего канала составляет 5 – 8 мкм,

Использование нажима сверху посредством пуансона, накрывающего оба конца волокна с длинной стороной, параллельной оси волокон, даже при выборе достаточно податливого и упругого материала детали с клиновидным

желобом не дает возможности совместить в вертикальной плоскости оси концов волокон. Последнее обусловлено западанием конца волокна с меньшим диаметром на более глубокий уровень, чем уровень залегания в клиновидном желобе конца волокна с большим диаметром.

Этого удастся избежать, если канавку–желоб сделать цилиндрически симметричным в виде полого полуцилиндра. В этом случае нижние образующие цилиндрических концов волокон, размещенные в одной и той же вертикальной плоскости с их осями, при свободном размещении последних в круглом желобе расположены на одном и том же горизонтальном уровне (рис. 2.21).

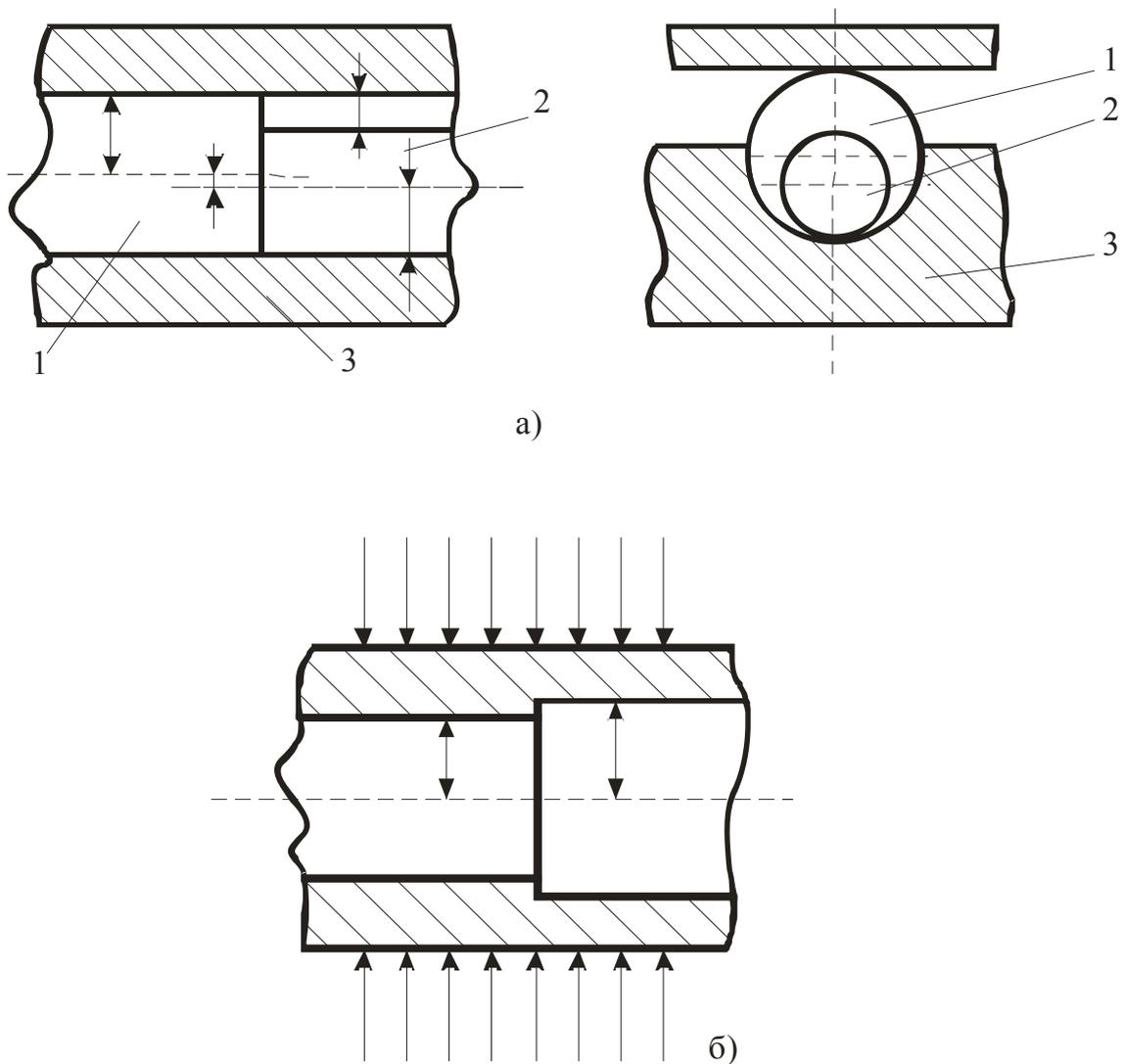


Рисунок 2.21 – Самоустиряющееся соединительное устройство до (а) и после (б) сжатия

Устройство для соединения двух одномодовых волокон [46] предполагает осуществлять нажим на концы волокон шариками с пружинами. Назван-

ное устройство позволяет получить наименьшее расстояние между осями в вертикальной плоскости, равное разности диаметров волокон (т.е. до 10 мкм). При подобном смещении осей потери достигают 4 дБ. Самоюстировка в вертикальной плоскости достигается прижатием в одной точке каждого из волокон вблизи его конца, вследствие чего концы волокон изгибаются на участке нажатия. Появляется заметный излом обоих концов волокон. Угол между осями у торцов волокон составляет 2×10^{-2} радиана, что приводит к потерям в 3,7 дБ. Суммарные потери могут достигать 7,7 дБ.

Удачным решением является построение круглого желоба с диаметром, равным наибольшему диаметру волокна в нижней пластине эластичного органического материала с модулем упругости, значительно меньшим, чем у волокна. Глубина желоба меньше наименьшего значения диаметра сопрягаемых волокон на 10 мкм. Она составляет 110 мкм при наименьшем диаметре волокна 120 мкм. Если волна находится в желобе, то их оптические оси отъюстированы самим желобом в вертикальной плоскости с высокой точностью, поскольку круглый желоб, так же как и клиновидный, является самоцентрирующим.

Один из лучших вариантов предполагает предварительное введение в желоб одного из концов волокон и его предварительную юстировку по горизонтальному движению и предварительное закрепление дополнительным зажимом, расположенным за пределами основного зажимного устройства. Второй конец вводится после закрепления первого. Общая длина вводимых участков волокон подбирается так, чтобы она на 0,5 мкм превышала расстояние l между дополнительными фиксаторами, расположенными вне основного зажимного устройства. Это обеспечивает соединение торцов волокон до упора, хотя при этом на названных участках длины l образуется незначительная дуга прогиба $\Delta l = 0,25$ мм.

Одна из конструктивных задач состоит в том, чтобы минимизировать отношение $\frac{\Delta l}{l}$.

Возможны варианты введения второго конца волокна после введения первого при использовании высокоточного ограничителя, зафиксированного на нем без стыковки в упор с появлением пути выгиба за счет суммы длины волокон на участках l на 0,5 мкм.

Введение обоих концов волокон упрощается, если желоб в пластине соединительного устройства к обоим концам этой пластины расширяется за пределами основного зажимного устройства: названные участки желоба играют роль нижних частей ловителей. После введения обоих волокон встык осуществляется их зажим верхней пластиной, имеющей плоскую поверх-

ность на участке основного зажимного устройства. За пределами этого участка на обеих пластинах сформированы полуконусы с одинаковыми размерами и формой, которые при наложении друг на друга образуют полые конусы-уловители, направляющие оба гибких конца стыкуемых волокон в центральную часть желоба.

Кроме варианта с последовательным продвижением обоих концов волокон возможен вариант с одновременным их продвижением.

После того, как оба волокна стыкованы в центре желоба нижней пластины, на них надвигается верхняя пластина, которая начинает давить на их верхние части, выступающие из желоба. Вначале верхняя пластина давит только на верхнюю часть конца волокна с большим диаметром (например, 130 мкм). Этот конец начинает погружаться симметрично в упругое податливое дно желоба и в верхнюю пластину из такого же упругоподатливого материала. После того, как глубина деформированной области в верхней пластине и желобе достигнет 5 мкм, оси обоих концов волокон совместятся, и при дальнейшем сжатии будут оставаться совмещенными.

Юстировка состоит в том, что при погружении обоих концов стыкуемых волокон вместе с дном желоба и верхней пластины в упругоподатливый материал под действием нажима на оба конца в верхней упругой податливой пластине накапливаются деформации и напряжения такие, что образующееся поле упругих напряжений приобретает минимальную энергию только в том случае, если оси концов стыкуемых волокон совпадают. Это обусловлено близкой к цилиндрической симметрией системы. Принципиальным свойством, которым должна обладать данная система, является определенное соотношение механических свойств ее компонентов. Материал верхней и нижней пластины зажимного устройства должен иметь модуль упругости, например, в 50 раз меньше, чем у материала волокна. Тогда при приложении в верхней пластине сжимающего усилия 0,3Н возникнет суммарная деформация сжатия обеих пластин в области, прилегающей к толстому волокну, более 10 мкм, а деформация самого волокна – порядка 0,1 мкм.

2.4 Выводы по разделу

1) Экспериментальное исследование стыковки концов волокон, вклеенных в наконечники, показало, что для ее реализации требуется прецизионная обработка втулки и цилиндрической образующей наконечников, которая выполнима на особо точном оборудовании высококвалифицированным персоналом.

2) Теоретические и экспериментальные исследования принципов

построения соединительного устройства на сферических микролинзах показали, что расширение пучка в межлинзовом пространстве до 0,4 – 1,0 мм, снижая требуемый допуск на поперечное смещение, обуславливает необходимость прецизионной юстировки пучка света, на торце входного конца волокна по пятну и по углу, что существенно усложняет конструктивно–технологическую реализацию соединительного устройства.

3) Предложено нетрадиционное для оптики конструктивно–технологическое решение, основанное на принципе самоюстировки ОВ, заключающемся в помещении концов стыкуемых волокон в цилиндрическую канавку зажимных пластин из эластомера. Данное решение обеспечивает юстировку стыкуемых волокон при обычных допусках на изготовление стыковочного узла, не требует высококвалифицированного персонала, специального оборудования и позволяет создать надежное соединительное устройство невысокой себестоимости.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ СТЫКОВКЕ ВОЛОКОН

Основной задачей при разработке конструкции и технологии изготовления соединительного устройства является снижение потерь. Для современного одномодового волокна достигнут коэффициент затухания, равный 0,2 – 0,5 дБ/км, поэтому потери, вносимые соединительным устройством, не должны превышать 0,17 – 0,25 дБ.

Роль соединительных устройств оказывается решающей с точки зрения определения потерь в оптических каналах связи. Ниже приводится статистический анализ потерь в соединительных устройствах различных конструкций, выполнены расчеты для выяснения влияния рассогласования соединяемых концов волокон на потери в соединительном устройстве, а также проведены экспериментальные измерения вносимых потерь.

Методика определения влияния рассогласования на потери при стыковке концов ОВ показывает, что конструкции соединительных устройств и технологии их изготовления должны обеспечивать весьма жесткие допуски. Рассмотрим возможные потери, возникающие при соединении оптических волокон.

3.1 Методика расчёта потерь, вносимых в оптические каналы связи

Коэффициент передачи оптической мощности (коэффициент прохождения) D при торцевом соединении определяется как $D = P_{out} / P_{in}$, а вносимые потери a - исходя из соотношения $a = -10 \lg D = -10 \lg P_{out} / P_{in}$ [дБ], где P_{in} и P_{out} соответственно интенсивности излучения на входе и выходе соединения. Точный замер этих параметров на практике соответствует следующей процедуре. Сначала находят интенсивность на непрерывном участке волокна, что соответствует градуировке приемника (P_{in}). Затем разрезают волокно и после оконцевания соединительными устройствами мест разрыва вновь соединяют. Вторичный замер интенсивности соответствует P_{out} . Обычно вносимые потери зависят от типа волокна (многомодовое или одномодовое), типов и качества соединительных устройств и составляют от 0,3 до 0,5 децибела. Вносимые потери можно разбить на две категории: внутренние и внешние потери.

Внутренние потери определяются факторами, которые невозможно контролировать (достичь их улучшения при заделке волокна в соединительное устройство), а именно парной вариацией диаметров сердцевин, показателей преломления, числовых апертур, эксцентриситетов сердцевина / оболоч-

ка и концентричности сердцевины у волокон с разных сторон. Причем следует аддитивно учитывать все эти потери. Можно ожидать случайное изменение этих факторов даже в том случае, когда волокна одинакового стандарта или с одной и той же катушки. Эти факторы проявляются меньше на непрерывном сегменте оптического кабеля, так как они плавно меняются с длиной.

На внутренние потери влияет технология производства волокна и соответствующие критерии контроля качества, а не принципы построения соединительного устройства. Зная разброс значений перечисленных выше параметров, можно определить максимальное значение внутренних потерь.

Потери из-за вариации показателей преломления являются следствием чисто френелевского отражения и определяются в простейшем случае для волокна со ступенчатым профилем как $a_F = -10\lg(4n_1n_2 / (n_1+n_2)^2)$ [дБ], где n_1 и n_2 - показатели преломления волокон (зазора между волокнами нет). Эти потери пропадают только при равенстве показателей преломления.

Потери при вариации апертур возникают в том случае, если апертура волокна, передающего сигнал NA_1 , больше апертуры волокна, принимающего сигнал NA_2 , и определяются как $a_{NA} = -10\lg(NA_1/NA_2)^2$ [дБ]. При $NA_1 < NA_2$ апертурные потери не возникают. Потери при вариации диаметров возникают, когда диаметр передающего волокна меньше диаметра принимающего, и определяются соотношением $a_D = -10\lg(D_2/D_1)^2$ [дБ], где D_1 и D_2 - диаметры передающего и принимающего волокон, соответственно. При $D_1 < D_2$ потери не возникают.

Соединение волокон 62,5/125 и 50/125. Факт наличия двух основных широко распространенных стандартов многомодового градиентного волокна 50 мкм и 62,5 мкм нужно принять как свершившийся. Многомодовое волокно наибольшее применение имеет при строительстве локальных сетей. Украинские заводы по производству волоконно-оптического кабеля более широко используют стандарт многомодового волокна с диаметром светонесущей жилы 50 мкм отечественного производства.

Если свет распространяется из волокна 50/125 в волокно 62,5/125, то потери интенсивности света не происходит (мы пренебрегаем другими потерями). Если же свет переходит из волокна 62,5/125 в волокно 50/125, то только доля (50/62,5) интенсивности света будет во втором волокне, что соответствует потерям 1,94 дБ.

Этот факт учитывается при построении оптических приемопередатчиков. Так, обычно светодиод передатчика рассчитан на волокно меньшего диаметра (50 мкм), а приемник в этом же устройстве на волокно большего диаметра (62,5 мкм). В этом случае не является строго обязательным исполь-

зование в кабельном сегменте, соединяющим такие устройства, стандарта волокна 62,5/125, рекомендованного спецификацией *ANSI/TIA/EIA-568A*.

Более того, многие сетевые стандарты закладывают большой запас по затуханию в оптических каналах связи. Например, стандарты физического уровня на многомодовое волокно *FDDI (PMD)*, *Fast Ethernet (100Base-FX)* рассчитаны на максимальное допустимое затухание в линии до 11 дБ при максимальном допустимом расстоянии 2 км. Если учесть, что потери в кабеле составляют 3 дБ/км, а в соединительном устройстве с однотипными волокнами – 0,5 дБ, то один дополнительный переход с 62,5 на 50 мкм, вносящий затухание 2,5 дБ, не будет критичным даже при максимальной длине кабельного сегмента (2 км).

Соединение многомодового и одномодового волокон. Еще большие внутренние потери (примерно 16 дБ) возникают при сопряжении многомодового и одномодового волокна, когда свет распространяется из первого во второе волокно.

Внешние потери – это потери, которые являются следствием несовершенства как принципов построения соединительного устройства, так и процесса сборки оптического шнура. Внешние потери зависят от таких факторов как: механическая нестыковка (угловое смещение Θ , радиальное смещение L , осевое смещение S); шероховатости на торце сердцевины; загрязнение участка между торцами волокон, рис. 3.1.

Потери при угловом Θ , радиальном L и осевом S смещениях определяются соответственно формулами (рис. 3.1 а, б, в):

$$a_{\theta} = -10 \lg \left(1 - \frac{2\theta}{\pi \arcsin NA} \right) \text{ [дБ]}, \quad (3.1)$$

$$a_L = -10 \lg \left(1 - \frac{4L}{\pi D} \right) \text{ [дБ]}, \quad (3.2)$$

$$a_S = -10 \lg [1 / (1 + 2(S/D) \operatorname{tg} [\arcsin(NA/n_0)])]^2 \text{ [дБ]}, \quad (3.3)$$

где NA – апертура волокна, D – диаметр светонесущей части волокна, L – радиальное смещение, S – осевое смещение, n_0 – показатель преломления среды, заполняющей пространство стыка.

Некачественная полировка торцов волокон, а также трение, возникающее при многократном переподключении соединительных устройств (имеющих физический контакт), может привести еще к одному типу потерь – потерь, связанных с рассеянием на микротрещинах (рис. 3.1 г).

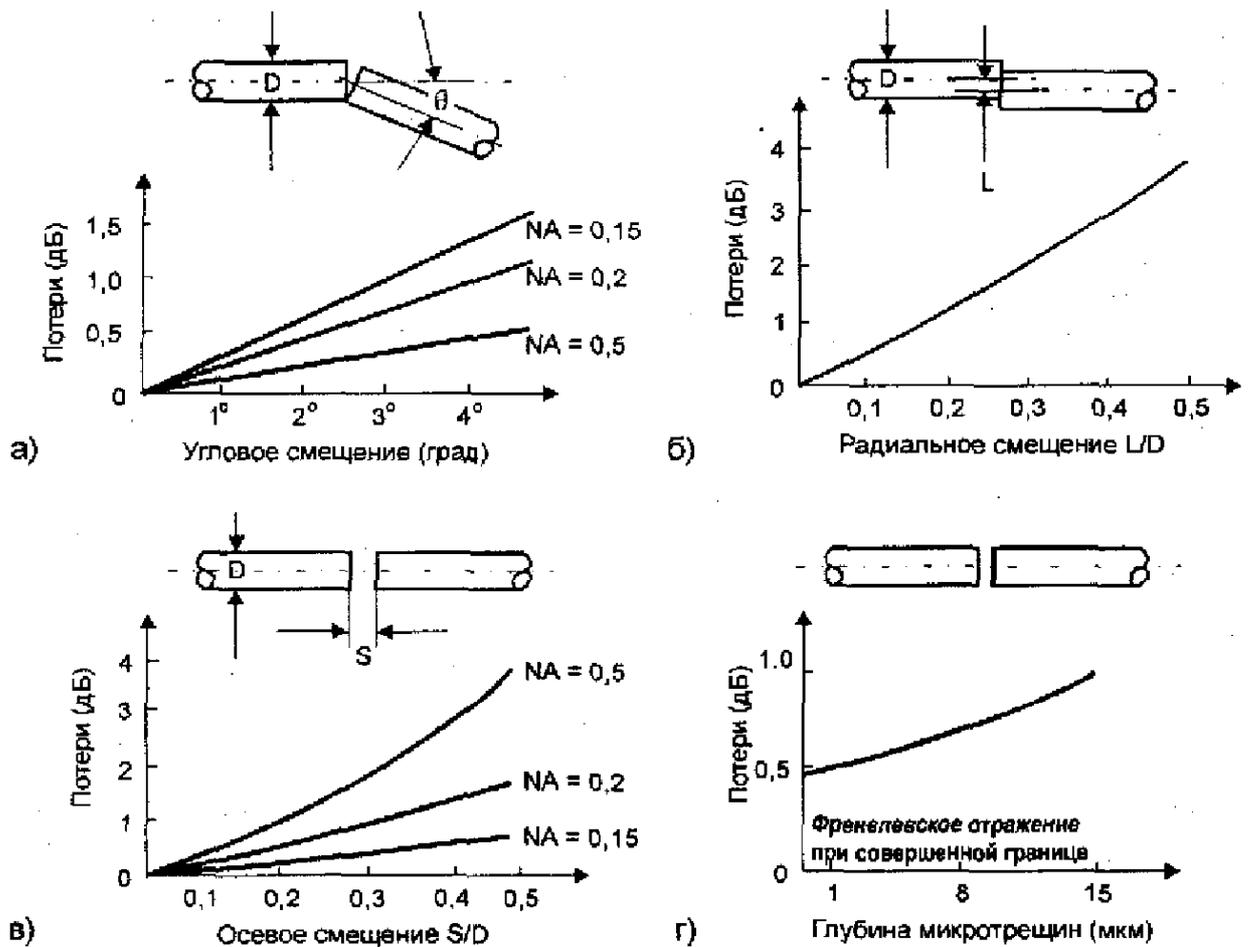


Рисунок 3.1 – Четыре главных вида внешних потерь в соединительном устройстве: а) потери при угловом смещении; б) потери при радиальном смещении; в) потери при осевом смещении; г) потери из-за френелевского рассеяния на неоднородностях

Приведенное соотношение для потерь при осевом смещении учитывает только фактор апертурной расходимости светового потока. Однако при появлении зазора между волокнами появляется и френелевское отражение из-за того, что среда, заполняющая пространство между открытыми плоскостями торцов волокон имеет отличный от волокон показатель преломления, рис. 3.2.

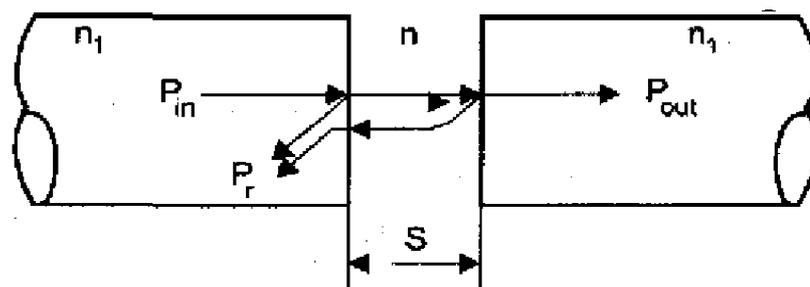


Рисунок 3.2 – Френелевское отражение

С учетом двух скачков показателей преломления коэффициент прохождения определяется из соотношения:

$$D_F = \frac{4n_1^2 n^2}{4n_1^2 n^2 + (n_1^2 - n^2)^2 \sin^2(2\pi nS/\lambda)}. \quad (3.4)$$

При величине зазора, сравнимой с длиной волны или большей, по осцилляциям синуса можно произвести усреднение. Тогда потери определяются как $a_F = -10\lg D_F = -10\lg(2n_1 n_2 / (n_1^2 + n_2^2))$ [дБ], где n_1 - показатель преломления волокна ($\approx 1,5$), одинаковый для обеих сторон, n - показатель преломления среды в зазоре, рис. 3.2. В случае воздушного зазора ($n = 1$) потери составляют 0,35 дБ. френелевские потери можно уменьшить, подбирая наполнитель между соединительными устройствами, близкий по показателю преломления к волокну, или делая зазор много меньше длины волны.

Обычно суммарные потери в соединительном устройстве составляют до 0,3-0,4 дБ для одномодового и многомодового волокон. При этом, естественно, более жесткие требования предъявляются к качеству одномодового соединительного устройства.

3.2 Методика измерений потерь, вносимых оптическими соединительными устройствами

В настоящее время разработаны различные методики измерения величины вносимых потерь оптических соединительных устройств.

В нашей стране применяют метод измерения вносимого затухания в соответствии с ГОСТ 26599-85. В соответствии с этим ГОСТом оптическими вносимыми потерями называют отношение суммарной мощности оптического излучения на входных оптических полюсах компонента оптического канала связи к суммарной мощности оптического излучения на выходных полюсах компонента оптического канала связи, выраженное в децибелах. Соответственно, при измерении вносимого затухания определяют разность уровней мощности, воспринимаемой приемником излучения при его непосредственном подключении к источнику излучения, и мощности, поступающей на приемник при его включении на выходе измеряемого волокна, концы которого армированы оптическими соединительными устройствами. Схема измерения вносимого затухания представлена на рис. 3.3.

По схеме на рис. 3.3,а измеряется уровень мощности оптического излучения на выходе "эквивалентного источника излучения", который представляет собой источник 1 с подключенным к нему армированным по концам ко-

ротким отрезком ОВ. Уровень мощности $P_{вх}$ измеряется на выходе данного отрезка ОВ. Затем по схеме, приведенной на рис 3.3, б измеряется уровень мощности $P_{вых}$ на выходе измеряемого ОВ. При этом оптическое излучение вводится в измеряемое волокно с выхода "эквивалентного источника излучения" путем соединения через проходную розетку армированных концов короткого отрезка волокна и измеряемого ОВ. Вносимое затухание определяется как разность уровней:

$$\alpha = P_{вх} - P_{вых}, [dB] \quad (3.5)$$

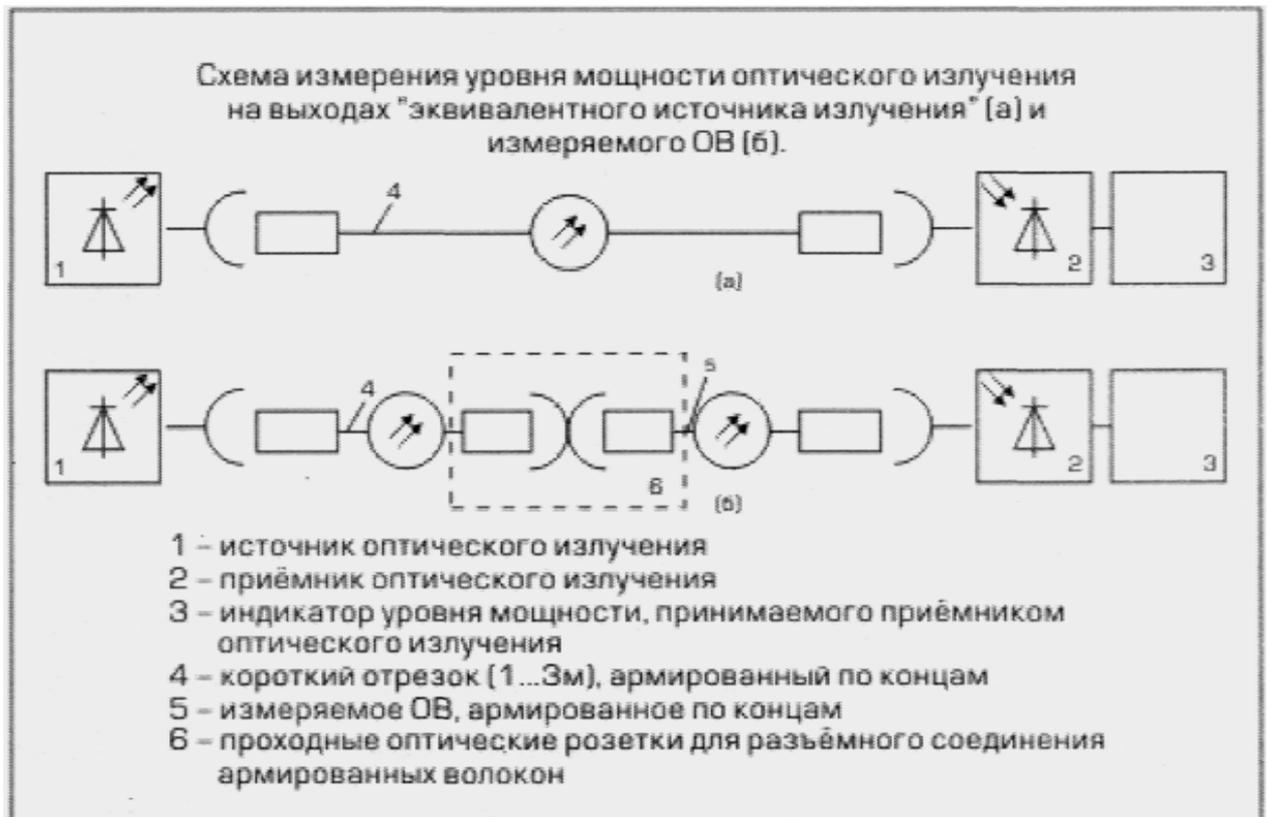


Рисунок 3.3 – Схема измерения вносимого затухания по ГОСТ 26599–85

Погрешность данного метода относительно велика, однако она вполне приемлема для паспортизации регенерационных участков.

В Соединенных Штатах аналогом данного метода являются стандарт *EIA RS455 FOTP – 171*. Существует две схемы измерений. Схема измерений "а" полностью аналогична отечественной. Схема измерений "б" приведена на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Схема измерения вносимого затухания по *FOTP-171*

По схеме на рис. 3.4: 1 – источник оптического излучения; 2 – розетка оптического разъема; 3 – вспомогательный соединительный оптический шнур с ОСУ; 4 – измеряемый соединительный оптический шнур; 5 – измеритель оптической мощности.

Калибровка измерительной схемы производится путем стыковки разъемов вспомогательных шнуров в точке *A* и фиксации уровня принимаемой оптической мощности P_1 [dBm].

Измерение величины вносимых потерь определяется путем подключения тестируемого шнура с коннекторами в точки *A* и *B* и фиксации уровня принимаемой мощности P_2 [dBm]. Величина вносимых потерь будет равна:

$$\alpha = P_1 - P_2, [dB] \quad (3.6)$$

Точность данных методик измерения от 0,3 до 0,6 dB.

По обоим методикам измерениям подвергается не только соединительное устройство, но и розетка пристыкованная к нему – это так называемая коннекторная сборка.

Существует еще одна методика измерений величины оптических потерь – это *TR NWT-000326*. Она рекомендована *Bellcore*. Данная методика позволяет определить величину вносимых оптических потерь целой сборки, состоящей из двух оптических коннекторов состыкованных в адаптере (розетке). Схема измерения приведена на рис.3.5.

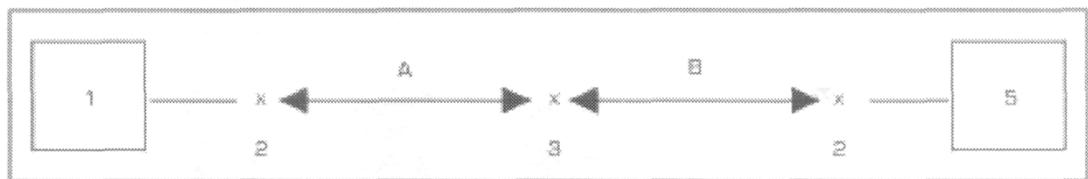


Рисунок 3.5 – Схема измерения вносимого затухания по *TR NWT-000326*

По схеме приведенной на рис. 3.5: 1 – источник оптического излучения; 2 – вспомогательный *pigtail*; 3 – измеряемые *pigtails* состыкованные в розетке; 4 – измеритель оптической мощности.

Измерение величины вносимых потерь производится в следующей последовательности:

а) производится сварка оптических волокон *pigtails* (2) в точке *A* и фиксация уровня принимаемой оптической мощности P_1 [dBm];

б) сварное соединение нарушается и между точками *A* и *B* производится подварка *pigtails* 2-х измеряемых оптических соединительных устройств состыкованных в розетке (адаптере) фиксируется уровень принимаемой оптической мощности P [dBm];

в) определяется величина вносимых оптических потерь: $\alpha = P_1 - P_2$ [dB]. Точность измерения данного метода, при использовании идентичных волокон, может составлять 0,01 дБ.

В соответствии с вышеизложенными методиками определения потерь сигнала в оптических соединительных устройствах проведем экспериментальные исследования.

3.3 Обработка результатов эксперимента по измерению потерь в соединительном устройстве оптического канала связи

Проведена статистическая обработка результатов измерений потерь в соединительных устройствах оптических каналов связи.

Любой параметр, определенный с помощью конечной случайной выборки, является случайной величиной. Поэтому из конечной выборки нельзя судить о значении параметра, а можно только его оценивать. Числовые значения отдельных параметров, которые определены из конечной, ограниченной выборки, являются оценкой параметров бесконечной (генеральной) последовательности.

Стоит отметить, что при построении и экспериментальном исследовании компонентов оптических каналов связи возникает проблема определения свойств характеристик генеральной последовательности на основе обработки данных небольшой ее части – случайной выборки. Выборка является представительной, если характеристики, полученные на основе выборочных данных, достаточно хорошо описывают свойства генеральной последовательности.

При статистическом оценивании параметров конструкций оптических каналов связи возникают задачи:

- организации выборки, разработки методов отбора элементов выборки из генеральной последовательности;
- определение необходимого объема выборки;
- вычисление точечных оценок характеристик генеральной совокупно-

сти;

– определение доверительных интервальных оценок.

Необходимо помнить, что точечная оценка характеризует значение параметра в некоторой точке (в достаточно малом ее окружении) и выражается одним числом. Преимущество стоит отдавать тем оценкам, которые удовлетворяют критериям несмещённости, эффективности.

Несмещенной, эффективной оценкой математического ожидания \tilde{M}_X случайной величины X есть среднеарифметическое значение выборки

$$\tilde{M}_X = \frac{1}{N} \sum_1^N Xi . \quad (3.7)$$

Случайной величиной X может быть любой параметр ОКС, который исследуется. Значение \tilde{M}_X случайной величины X изменяется от выборки к выборке, потому \tilde{M}_X также является случайной величиной, которая имеет свои характеристики и подчиняется определенному закону распределения. Математическое ожидание оценки $M[\tilde{M}_X]$ равняется математическому ожиданию генеральной последовательности

$$M[\tilde{M}_X] = M_X , \quad (3.6)$$

а дисперсия оценки математического ожидания в n раз меньше дисперсии генеральной последовательности

$$D[\tilde{M}_X] = \frac{D_X}{n} , \quad (3.7)$$

или

$$\sigma[\tilde{M}_X] = \frac{\sigma_X}{\sqrt{n}} , \quad (3.8)$$

где n – объем выборки.

Несмещенная оценка дисперсии определяется так:

$$\tilde{D}_X = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (Xi - \tilde{M}_X)^2 . \quad (3.9)$$

Необходимо обратить внимание на то, что значительно более информации, по сравнению с точечной, несет интервальная оценка. Интервал J , в котором с вероятностью, близкой к единице, находится значение параметра, который оценивается, называется доверительным интервалом. Если есть точечная оценка параметра – $\tilde{\alpha}$ и известна плотность распределения вероятностей $f(\tilde{\alpha})$ для этой оценки, то предел доверительного интервала может быть получен из соотношения

$$P(\tilde{\alpha} - \varepsilon < \alpha < \tilde{\alpha} + \varepsilon) = \int_{\tilde{\alpha} - \varepsilon}^{\tilde{\alpha} + \varepsilon} f(\tilde{\alpha}) d\tilde{\alpha} = \beta, \quad \varepsilon = \frac{J_\beta}{2}. \quad (3.10)$$

Потому, что оценка $\tilde{\alpha}$ является случайной величиной, то размещения интервала и его длина являются также случайными (рис. 3.6).

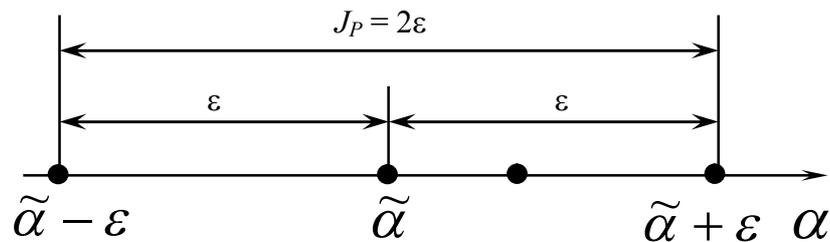


Рисунок 3.6 – Доверительный интервал для параметра α

Необходимо знать, что доверительный интервал для математического ожидания при большом объеме выборки ($n > 20$) определяется по методике на основе нормального закона распределения. При этом вводится допущение $\tilde{D}_X > D_X$, что не всегда справедливо. При небольшом объеме выборки ($n < 20$) выборочная дисперсия превышает точное значение дисперсии $\tilde{D}_X > D_X$. Поэтому при малых n для определения доверительных интервалов рекомендуется пользоваться методикой на основе распределения Стьюдента. Закон распределения оценки $\tilde{\alpha}_X$ в общем случае зависит от самих неизвестных параметров величины X . Иногда с переходом от случайной величины $\tilde{\alpha}_X$ к другой переменной X_1, X_2, \dots, X_n , можно получить закон распределения, который не зависит от неизвестных параметров, а зависит только от числа опытов n и вида закона распределения величины X . Для случая нормального распределения величины X случайные величины наиболее обстоятельно изучены.

При нормальном распределении величины X случайная величина T

$$T = \sqrt{n} \frac{\tilde{M}_X - M_X}{\sqrt{\tilde{D}_X}} \quad (3.11)$$

подчиняется так называемому закону распределения Стьюдента со $n - 1$ степенью свободы.

Если n достаточно большое, то распределение Стьюдента практически не отличается от нормального.

Если случайная величина X , распределенная по нормальному закону с неизвестными параметрами M_X и D_X , и для этих параметров определены оценки \tilde{M}_X и \tilde{D}_X , то можно найти доверительный интервал $J_\beta = 2\varepsilon$ для математического ожидания и значение ε , чтобы выполнялось условие

$$P(|\tilde{M}_X - M_X| < \varepsilon) = \beta. \quad (3.12)$$

Умножив обе части неравенства на положительную величину $\sqrt{n}/\sqrt{\tilde{D}_X}$, где n – количество независимых опытов, переходим от случайной величины \tilde{M}_X к случайной величине T , распределенной по закону Стьюдента:

$$P\left(\frac{\sqrt{n}|\tilde{M}_X - M_X|}{\sqrt{\tilde{D}_X}} < \frac{\varepsilon}{\sqrt{\frac{\tilde{D}_X}{n}}}\right) = \beta. \quad (3.13)$$

Обозначим

$$t_\beta = \varepsilon / \sqrt{\frac{\tilde{D}_X}{n}}.$$

Величина t_β является параметром распределения Стьюдента, который зависит от доверительной вероятности β и числа степеней свободы $K = n - 1$ и может быть определен из соответствующих табличных значений.

Если t – определен, то доверительный интервал для математического ожидания случайной величины, можно определить по формуле:

$$J_{\beta} = 2\varepsilon = 2t_{\beta} \sqrt{\frac{\tilde{D}_X}{n}} . \quad (3.14)$$

При $K > 30$ распределение Стьюдента практически совпадает с нормальным распределением.

Нужно подчеркнуть, что площадь под кривой любого закона распределения плотности вероятности равняется единице.

Рассмотрим пример статистической обработки результатов измерений потерь в соединителях волоконно-оптических кабелей.

В ходе выполнения экспериментальных исследований измерены потери оптической энергии в разъемном соединительном устройстве для различных комбинаций световодов. Результаты измерений представлены в табл. 3.1

Из полученной выборки исключены нетипичные значения, которые являются грубыми ошибками: $\alpha = 1.5$; $\alpha = 2.9$; $\alpha = 1,3$.

Статистическая обработка результатов измерений проведена ниже в соответствии с методикой оценки с помощью доверительных интервалов.

Проведена оценка дисперсии и среднеквадратического отклонения по выборке измерений:

– дисперсия по выборке:

$$\delta = \frac{\sum (X_i - \bar{X}_i)^2}{N - 1} = 0,000661744;$$

– стандартное отклонение по выборке:

$$Z = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X}_i)^2}{N - 1}} = 0,025724379;$$

– среднееарифметическое значение выборки:

$$\bar{X}_i = \sum \frac{X_i}{N} = 0,20843125;$$

Для заданной надежности $\alpha=0,95$ и количества наблюдений $N=148$ определен коэффициент Стьюдента ($k=N-2=146$): $t_{\alpha}=1,976$.

С помощью пакета анализа данных в ППП MATLAB построена гистограмма для выборки значений потерь в соединителях (рис. 3.4).

Таблица 3.1 – Результаты измерений потерь оптической энергии в разъемном соединительном устройстве для различных комбинаций световодов

| № п/п | α |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 0,13 | 21 | 0,20 | 41 | 0,18 | 61 | 0,17 | 81 | 0,17 | 101 | 0,12 | 121 | 0,15 | 141 | 0,18 |
| 2 | 0,12 | 22 | 0,20 | 42 | 0,18 | 62 | 0,17 | 82 | 0,15 | 102 | 0,13 | 122 | 0,20 | 142 | 0,17 |
| 3 | 0,11 | 23 | 0,20 | 43 | 0,13 | 63 | 0,18 | 83 | 0,19 | 103 | 0,14 | 123 | 0,17 | 143 | 0,18 |
| 4 | 0,20 | 24 | 0,20 | 44 | 0,20 | 64 | 0,19 | 84 | 0,18 | 104 | 0,15 | 124 | 0,18 | 144 | 0,19 |
| 5 | 0,14 | 25 | 0,17 | 45 | 0,12 | 65 | 0,14 | 85 | 0,18 | 105 | 0,25 | 125 | 0,19 | 145 | 0,17 |
| 6 | 0,15 | 26 | 0,18 | 46 | 0,13 | 66 | 0,20 | 86 | 0,19 | 106 | 0,14 | 126 | 0,19 | 146 | 0,19 |
| 7 | 0,11 | 27 | 0,19 | 47 | 0,17 | 67 | 0,15 | 87 | 0,12 | 107 | 0,12 | 127 | 0,19 | 147 | 0,17 |
| 8 | 0,15 | 28 | 0,17 | 48 | 0,20 | 68 | 0,19 | 88 | 0,12 | 108 | 0,18 | 128 | 0,16 | 148 | 0,20 |
| 9 | 0,17 | 29 | 0,16 | 49 | 0,18 | 69 | 0,20 | 89 | 0,16 | 109 | 0,17 | 129 | 0,11 | 149 | 0,20 |
| 10 | 0,20 | 30 | 0,20 | 50 | 0,20 | 70 | 0,18 | 90 | 0,11 | 110 | 0,19 | 130 | 0,12 | 150 | 0,10 |
| 11 | 0,18 | 31 | 0,20 | 51 | 0,21 | 71 | 0,14 | 91 | 0,13 | 111 | 0,20 | 131 | 0,14 | 151 | 0,12 |
| 12 | 0,17 | 32 | 0,19 | 52 | 0,20 | 72 | 0,15 | 92 | 0,17 | 112 | 0,17 | 132 | 0,13 | 152 | 0,19 |
| 13 | 0,16 | 33 | 0,20 | 53 | 0,18 | 73 | 0,18 | 93 | 0,17 | 113 | 0,14 | 133 | 0,11 | 153 | 0,17 |
| 14 | 0,17 | 34 | 0,17 | 54 | 0,17 | 74 | 0,19 | 94 | 0,17 | 114 | 0,14 | 134 | 0,14 | 154 | 0,13 |
| 15 | 0,18 | 35 | 0,17 | 55 | 0,18 | 75 | 0,17 | 95 | 0,17 | 115 | 0,19 | 135 | 0,17 | 155 | 0,18 |
| 16 | 0,18 | 36 | 0,13 | 56 | 0,11 | 76 | 0,11 | 96 | 0,14 | 116 | 0,17 | 136 | 0,14 | 156 | 0,15 |
| 17 | 0,19 | 37 | 0,14 | 57 | 0,14 | 77 | 0,17 | 97 | 0,11 | 117 | 0,15 | 137 | 0,14 | 157 | 0,12 |
| 18 | 0,19 | 38 | 0,12 | 58 | 0,17 | 78 | 0,14 | 98 | 0,12 | 118 | 0,17 | 138 | 0,15 | 158 | 0,239 |
| 19 | 0,19 | 39 | 0,14 | 59 | 0,18 | 79 | 0,13 | 99 | 0,11 | 119 | 0,17 | 139 | 0,15 | 159 | 0,13 |
| 20 | 0,20 | 40 | 0,14 | 60 | 0,14 | 80 | 0,17 | 100 | 0,19 | 120 | 0,14 | 140 | 0,19 | 160 | 0,15 |

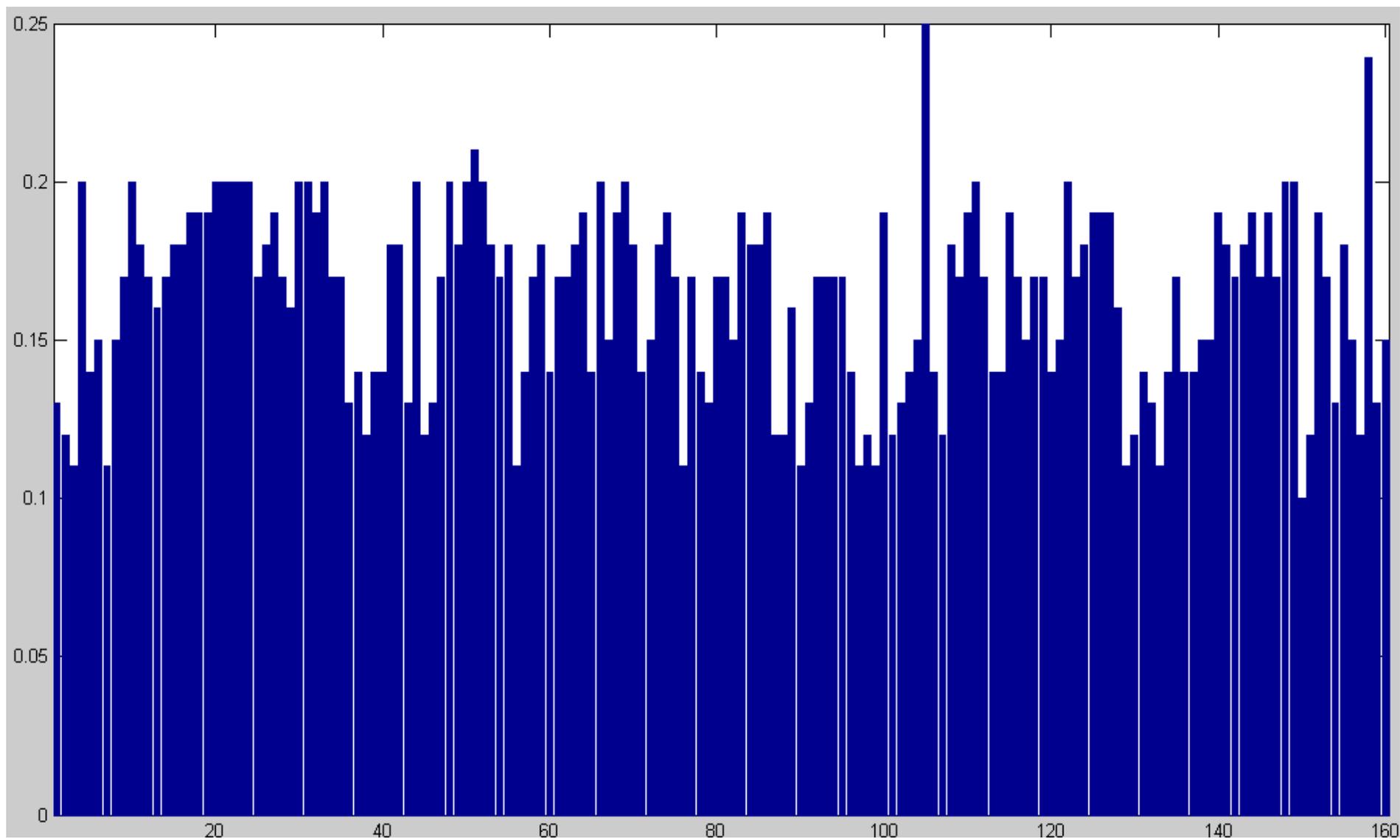


Рисунок 3.4 – Гистограмма для выборки значений потерь в соединительном устройстве

Величина доверительного интервала вычислена по формуле:

$$\Delta X = t_a \cdot \Delta Z_a,$$

где $\Delta Z_a = \frac{z}{\sqrt{N}}$,

$$\Delta X = 0,00417831.$$

Также определено значение доверительного интервала:

$$\Delta X = 0,00409173.$$

Таким образом, результат измерений потерь в соединителе можно записать в виде:

$$\bar{X} - \Delta X < X < \bar{X} + \Delta X$$

$$0,20843125 - 0,00409173 < X < 0,20843125 + 0,00409173$$

$$0,20433952 < X < 0,21252298$$

Для более детального анализа данных использовано средство статистического анализа – описательная статистика. Данный инструмент анализа служит для создания одномерного статистического отчета, содержащего информацию о центральной тенденции и изменчивости входных данных. В результате, для исследуемого набора данных получены статистические показатели, представленные в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Описательная статистика

| Показатель | Значение |
|------------------------|--------------|
| 1 | 2 |
| Среднее | 0,20843125 |
| Стандартная ошибка | 0,02435537 |
| Медиана | 0,207 |
| Мода | 0,25 |
| Стандартное отклонение | 0,025724379 |
| Дисперсия выборки | 0,000661744 |
| Эксцесс | -1,351550584 |
| Асимметричность | 0,1542102 |

Продолжение табл. 3.2

| 1 | 2 |
|----------------------------|------------|
| Интервал | 0.09 |
| Минимум | 0.163 |
| Максимум | 0.253 |
| Сумма | 33,349 |
| Счет | 160 |
| Уровень надежности (95,0%) | 0,00417831 |

3.4 Выводы по разделу

Проведенный статистический анализ факторов, обуславливающих вносимые потери при соединении концов одно– и многомодовых ОВ, для основных конструкций стыковочных узлов современных соединительных устройств показал, что:

а) необходима разработка точного теоретического метода расчета вносимых потерь в соединительном устройстве при его построении, а также потерь, обусловленных нарушением модовой структуры и геометрическими факторами, зависящими от возможных рассогласований стыкуемых концов ОВ;

б) при разработке конструкции стыковочного узла соединительного устройства необходимо принципиально новое решение, свободное от недостатков, позволяющее стыковать концы ОВ с различными диаметрами;

в) проведенный статистический анализ показал, что важное значение имеет задача изготовления зеркально-гладкого скола без применения операций шлифовки и полировки, ухудшающих его стойкость к воздействию влаги.

ВЫВОДЫ

В процессе выполнения квалификационной работы магистра, была достигнута цель работы и получены следующие результаты.

Разработана методика, позволяющая применить электродинамические методы для анализа рассогласования в ОВ с учетом распространения оптических сигналов в сердцевине и оболочке одномодовых волокон. Она основывается на двух независимых решениях, выбранных с учётом характеристического уравнения, и учитывает электромагнитные поля и потоки энергии в сердцевине и оболочке волокна, а также нарушения модовой структуры вследствие локальной неоднородности.

На основе разработанной методики определены допуски на поперечное рассогласование оптических осей волокон, угол между ними и параллельность торцов волокон, которые обеспечивают заданные вносимые потери. Показано, что полученные допуски намного ниже полученных методами геометрической оптики.

Предложен метод самоюстировки ОВ для построения соединительных устройств с малыми вносимыми потерями, достигаемыми за счет исключения нарушения модовой структуры и высокоточного совмещения оптических осей волокон. Из высокомолекулярных материалов выбран фторопласт-40 как наиболее пригодный для построения самоюстирующихся соединительных устройств. На основе анализа физико-механических параметров фторопласта-40 определен технологический режим формовки основных деталей соединительного устройства.

Разработан способ и предложена технология получения молекулярно-гладкого скола, обладающего коррозионностойкой поверхностью, строго перпендикулярной оси волокна, и пригодного для самоюстировки. Показано, что наилучшие результаты достигаются вводом в трещину смеси октилового спирта и ацетона, которая выполняет функции поверхностно-активной среды при раскрытии трещины.

Апробирован метод расчета оптических соединительных устройств со сферическими микролинзами. Показана возможность минимизации потерь в таких соединительных устройствах для многомодовых ОВ путем независимой компенсации потерь по пятну и по углу. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что в таких соединительных устройствах расширение пучка в межлинзовом пространстве до 0,4 – 1,0 мм, снижает требуемый допуск на поперечное смещение, требует прецизионной юстировки по углу.

Метод самоюстировки ОВ смоделирован в моделях разъемных оптических соединительных устройствах, сколы которых выполняются управляе-

мым раскалыванием в поверхностно-активной среде и которые обеспечивают вносимые потери при стыковке одномодовых волокон $0,17 \div 0,25$ дБ. Созданные разъемные оптические соединительные устройства одномодовых и многомодовых волокон с самоустиривкой ОВ не имеют аналогов по вносимым потерям среди аналогичных отечественных и зарубежных соединительных устройств.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов / Пер. с англ под ред. И.Н.Сисакяна. – М.: Мир, 1984. – 512 с.
2. Алишев Я.В. Многоканальные системы передачи оптического диапазона. – Минск: Вышэйшая школа, 1986. – 236 с.
3. Андрушко Л.М. Диэлектрические неоднородные волноводы оптического диапазона. – Киев: Техника –1983. – 144 с.
4. Балицкас С.К., Малтудис Э.К. Объемное разрушение оптических стекол многократным лазерным облучением // Квантовая электроника – 1981. – т.8. – №4. – с. 902 – 903.
5. Бартенев Г.М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. – М.: Стройиздат. 1974. – 240 с.
6. Бартенев Г.М. Строение и механические свойства неорганических стекол, – М.: Стройиздат, 1966. – 216 с,
7. Бартенев Г.М., Карташев Э.М. Влияние поверхностно–активных сред на пороговое неразрушающее напряжение полимеров в хрупком состоянии // Доклады АН СССР. – 1987. – т. 296. – № 4 – С. 894 – 898.
8. Беланов А.С., Григорьянц В.В., Потапов В.Т., Шатров А.Д. Передача оптических сигналов по световодам //Итоги науки и техники. Радиотехника. – 1984. – т. 30. – С. 3 – 158.
9. Белов А.В., Гурьянов А.Н., Гусовский Д.Д. и др. Одномодовые волоконные световоды на основе высокочистого кварцевого стекла с предельно низкими оптическими потерями // Высокочистые вещества. – 1988. – №3. – С. 189 – 193.
9. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1974. – 719 с.
10. Будников П.П. Химия и технология окислов и силикатных материалов. – Киев: Наукова думка, 1970. – 523 с.
11. Вайсбурд Д.И., Иванов А.В., Ландель В.Ф. и др. Хрупкое раскалывание стекол под действием периодического импульсного облучения мощными потоками электронов //Журнал технической физики. – 1984. – т. 54. – №2. – С. 375 – 376.
12. Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К. Оптика световодов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 319 с.
13. Велемицын Г.В., Шевкопляс Н.С., Куштанин И.И. и др. Соединители и узлы ввода излучения для волоконных световодов // Обзоры по электронной технике. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – М.,: ЦНИИ "Электроника". – 1985. – вып. 3 (1112). – 36 с.
14. Веселов Г.И., Раевский С.Б. Слоистые металлодиэлектрические

волноводы. – М.: Радио и связь, 1988. – 248 с.

15. Взятых В.Ф. Диэлектрические волноводы. – М.: Советское радио, 1970. – 216 с.

16. Волоконная оптика и приборостроение / М.М.Бутусов, С.Л.Галкин, С.П. Оробинский, Б.П. Пал. – Л.: Машиностроение, 1987. – 327 с.

17. Волоконно-оптическая связь. Приборы, схемы и системы, / Пер. с англ., под ред. М.Е. Жаботинского. – М.: Радио и связь, 1982. – 272 с.

18. Воробьева Г.Я. Химическая стойкость полимерных материалов. – М.: Химия, 1981. – 296 с.

19. Гаврилов И.А., Княжеченко И.В., Кузнецов В.А. и др. Разъемный соединитель для многоволоконного оптического кабеля // Приборы и техника эксперимента. – 1979. – № 4. – С. 277 – 278.

20. Галимов Н.Б., Косяков В.И., Садиков С.Н. и др. Оптический разъем на основе полимерных градиентных линз // Журнал технической физики. – 1983. – т. 53. – №4. – с. 786 – 788.

22. Гаприндашвили Х.И., Джангобегов Р.П., Коган В.Е. и др. Волоконная оптика: материалы, технология, применение. – Тбилиси: Мицниереба, 1984. – 149 с.

23. Глоге Д.К., Динье Л. Техническое оснащение систем на основе ТИИЭР. – 1980. – т. 68 – № 10. – С. 122 – 129.

24. Глушкова Д.Н., Зайцев О.М. Соединители для волоконно-оптических линий связи (по материалам зарубежных источников) // Электронная техника. Полупроводниковые приборы. – 1986. – вып. 2 (181). – С. 78 – 83.

25. Гончаренко А.М., Карпенко В.А. Основы теории оптических волноводов. – Минск: Наука и техника, 1983. – 238 с.

26. Горяинова А.В., Божков Т.К., Тихонова М.С. Фторопласты в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.

27. Гребенщиков И.В., Власов А.Г., Непорент Б.С. и др. Просветление оптики. Уменьшение отражения света поверхностью стекла М. – Л.; Гостехиздат, 1946. – 212 с.

28. Григорьянц В.В., Чаморовский Ю.К. Оптические параметры одномодовых волоконных световодов и методы их измерения // Радиотехника. – 1988 т. 33. – №8. – С. 56 – 66.

29. Далглейш Дж.Ф. Неразъемные соединения, разъемы и распределители мощности для применения в полевых условиях и в закрытых помещениях / УТИИЭР. – 1980. – т. 68, – № 10. – С. 68 – 75.

30. Девярых Г.Г., Дианов Е.М. Волоконные световоды с малыми оптическими потерями // Вестник АН СССР. – 1981. – № 10. – С. 54 – 66.

31. Дерюгин Л.Н. Интегральная оптика. – М.: Машиностроение, 1976 – 56 с.
32. Дианов Е.М., Прохоров А.М. Лазеры и волоконная оптика // Успехи физических наук. – 1986. – т. 148. – № 2. – С. 289 – 311.
33. Джаллорензи Т.Г. Исследования и техника систем оптической связи: Волоконная оптика // ТИИЭР. – 1978. – т. 66. – № 7. – С. 29 – 72.
34. Динье Л. Структура, параметры и передаточные характеристики волоконных световодов // ТИИЭР. – 1980. – т. 68. – № 10. – С. 8 – 15.
35. Дмитриев В.К. Разъемные соединители для многоволоконных и жгутовых оптических кабелей // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 1. – С. 178 – 180.
36. Дудко Г.В., Кравченко А.А., Чередниченко Д.И. Формирование предельно гладких поверхностей оптических стекол // Физика и химия стекла. – 1987. – т. 13, – № 5. – С. 740 – 746.
40. Евтихийев Н.Н., Засовин Э.А., Миповицкий Д.И. Волоконная и интегральная оптика в информационных системах. – М.; МИРЭА, 1987. – 223 с.
41. Закутов С.Г., Кочарян Р.А. Прямоугольный многоканальный самоустраивающийся соединитель для многоволоконных оптических кабелей // Электронная промышленность. – 1983. – № 7. – С. 18 – 20.
42. Зубюк Г.Г., Ивачевский А.И., Вульчин Ю.Г. и др. Метод обработки торцов волоконных световодов // Оптико-механическая промышленность. – 1986. – № 6. – С. 39 – 41.
43. Зябицкий А. Теоретические основы формирования волокон / Пер. с англ. О.К. Перепелкиной и К.Е. Перепелкина. – М.; Химия, 1979. 504 с.
44. Кабанов В.К., Кузнецов В.Ф., Орбинский С.П. Методы изготовления оптических соединителей для волоконно-оптических линий связи // Техника средств связи. Техника проводной связи, 1980, – вып. 12 (57). – С. 87 – 90.
46. Капани Н.С. Волоконная оптика.: Пер. с англ. / Под ред. В.В. Вейберга. Д.К. Саттарова. – М.; Мир, 1969. – 464 с.
47. Карташев Э.М., Бартенев Г.М. Полная изотерма долговечности стекла в вакууме // Физика и химия стекла. – 1981. – т. 7. – №2. – С. 181 – 187.
48. Каценеленбаум Б.З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. – М.: изд-во АН СССР, 1961. – 216 с.
49. Кириленко А.И. Разъем для волоконно-оптических кабелей // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 3. – С. 266.
50. Киселев В.Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках. – М.: Наука, 1970. – 399 с.
51. Козлов П.М. Применение полимерных материалов в конструкциях,

работающих под нагрузкой. – М.: Химия, 1966. – 360 с.

52. Кондратенко В.С. Лазерное управляемое термораскалывание стекла в производстве изделий электронной техники // Электронная промышленность. – 1988. – № 1. – С. 28 – 29.

53. Красюк Б.А., Корнеев Г.И. Оптические системы связи и световодные датчики. Вопросы технологии. – М.: Радио и связь, 1985. – 192 с.

54. Кузнецов В.Д. Поверхностная энергия твердых тел. – М.: Гостехтеориздат, 1954. – 258 с.

55. Кузьмин Ю.Г. Технология переработки плавких фторопластов. – М.: НИИТЭХим, 1978. – 38 с.

56. Куколев Г.В. Химия кремния и физическая химия силикатов. – М.: Высшая школа, 1966. – 463 с.

57. Кучикян Л.М. Световоды. – М.: Энергия, 1973. – 176 с.

58. Лазарев Л.П., Мировицкая С.Д. Контроль геометрических и оптических параметров волокон. – М.: Радио и связь, 1988. – 286 с.

59. Ланда К.А., Петровский Г.Т. Аморфные пленарные волноводы. – Красноярск: изд-во КГУ, 1987. – 196 с.

60. Ларри У. Быстрое соединение волокон // Электроника. – 1987. – т. 60. – № 2-е. С. 7 – 8.

61. Лейбфрид Г. Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов. – М.: Физматгиз, 1963. – 312 с.

62. Лейси Е. Влакнеста оптика / пер. от англ. В.А.Гутова. – София: Техника, 1986. – 216 с.

63. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер П.А. Физико-химическая механика металлов. – М.: Изд-во АН СССР. 1962. – 303 с.

64. Маковец Г.К., Покровский В.Р. Некоторые вопросы создания оптических разъемов // Радиотехника. – 1982. – т. 27. – № 2. – С. 50 – 52.

65. Марков П.И., Кеткович А.А., Саттаров Д.К. Волоконно-оптическая интроскопия. – Л.: Машиностроение, 1987. – 286 с.

66. Маркузе Д. Оптические волноводы / Пер. с англ. Под ред. В.В.Шевченко. – М.: Мир, 1974. – 576 с.

67. Мейер К. физико-химическая кристаллография. – М.: Металлургия, 1972. – 478с.

68. Микаэлян А.Л. Самофокусирующие волноводы и линзы с переменным показателем преломления: // Итоги науки и техники. Радиотехника, т. 24. – М.: ВИНТИ, с. 54 – 61.

69. Миндвинтер Дж. Э. Волоконные световоды для передачи информации / Пер. с англ. под ред. Е.М.Дианова. – М.: Радио и связь. – 1983. – 336с.

70. Миллер С.Е. , Маркатили Е.А., Ли Т. Исследования световодных

систем связи. //ТИИЭР. – 1973. – т. 61, № 12. – С. 46 – 64.

71. Мировицкий Д.И., Будагян И.Ф., Дубровин В.Ф. Микроволноводная оптика и голография. – М.: Наука, 1983. – 320 с.

72. Моисеев Ю.В., Заиков Г.Е. Химическая стойкость полимеров в агрессивных средах. – М.: Химия, 1979. – 288 с.

73. Моршнева С.К., Францесон А.В. Когерентная волоконно-оптическая связь: Обзор // Квант. электрон. – 1985. – 12, № 9. – С. 1786 – 1806.

74. Мурадян А.Г., Гольдфарб И.Х., Иноземцев В.П. Оптические кабели многоканальных линий связи. – М.: Радио и связь, 1987. – 200 с.

75. Невлюдов И.Ш., Малик Б.А., Филипенко А.И. и др. Система прецизионного позиционирования и контроля геометрических размеров // Повышение качества продукции в условиях автоматизированного производства: Тез. докл. науч.-практ. конф., 14 – 15 сентября 1988 г. – Харьков, 1988. – С. 131.

76. Невлюдов И.Ш., Малик Б.А., Лещенко Л.П. Технология и приспособления для обработки деталей компонентов ВОЛС // Прогрессивная технология и автоматизированное оборудование электронных устройств: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Львов, 1988. – С. 51 – 52.

78. Никитов В.А. Современное состояние и перспективы развития волоконно-оптических систем связи //Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – №6. – С. 64 – 79.

79. Оптика и связь. Оптическая передача и обработка информации / А. Козанне, Ж. Флере, Г. Мэтр, М. Руссо / Пер. с франц. под ред. В.К. Соколова. – М.: Мир, 1984. – 504 с.

80. Оптическое стекло. // Тр. Гос. опт. ин-та. – Л.: Машиностроение, 1972. – Т. 39, вып. 170. – 208 с.

81. Оробинский С.П., Миронов С.А., Гусев Ю.М. Двухконтактный оптический соединитель // Техника средств связи. Техника проводной связи. – 1984. – №1. – С. 37 – 41.

82. Основы волоконно-оптической связи / Под ред. М. Барноски; Пер. с англ. / Под ред. Е.М. Дианова. – М.: Советское радио. 1980. – 232 с.

83. Палатник Л.С., Сорокин В.К. Материаловедение в микроэлектронике. – М.: Энергия, 1978. – 280 с.

84. Пешков И.Б. Состояние и перспективы создания оптических кабелей связи // Электросвязь. – 1988. – № 3. – С. 2 – 3.

85. Плошай Л.Л., Смирнов В.И., Филимонов В.П. и др. Требования к оптическим соединителям // Электросвязь. – 1980. – № 12. – С. 38 – 40.

86. Потапов В.Т., Соколовский А.А., Шатров А.Д. Лучевой расчет мно-

гомодового оптического волокна // Радиотехника и электроника. – 1978. – т. 23. – №4. – С. 711 – 717.

87. Прочность стекла / Пер. с англ., под ред. проф. В.А. Степанова. – М.: Мир, 1969. – 339 с.

88. Ю.Прянишников В.П. Система кремнезема. – Л.: Стройиздат, 1971. – 238 с.

89. Пугачев А.К., Росляков О.А. Переработка фторопластов в изделия. Технология и оборудование. – Л.: Химия, 1987. – 169 с.

90. Радиационная стойкость материалов радиотехнических конструкций. Справочник под ред. к.т.н. И.А.Сидорова и к.т.н. В.К. Князева. – М.; Советское радио 1976. – 568 с. Авт.: Клязев В.К., Сидогюв Н.А., Курбаков В.Г., Касьянов Г.В.

91. Ребиндер Н.А. Избранные труды. – М.: Наука, т. 1. – 1978; т. 2 – 1979. – 268 с.

92. Семенов Н.А. Оптические кабели связи: Теория и расчет. – М.; Радио и связь, 1981. – 152 с.

115. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.

116. Соединитель с автоматической юстировкой торцов оптических волокон / Электроника. – 1976. – т. 49. – №23. – С. 19 – 20.

117. Справочник по пластическим массам / Под ред. В.М. Катаева, В.А.Попова, В.И.Сажина, – М: Химия, 1975. – т. 1 – 447 с., т. 2 – 567 с.

118. Справочник по волоконным оптическим линиям связи / Л.М.Андрушко, В.А.Вознесенский, В.Б.Каток и др.: Под ред. С.В.Свечникова и Л.М.Андрушко. – Киев: Техніка, 1988. – 239 с.

119. Степанчук В.Н., Лазорина Е.И., Сорока В.В. Влияние различной полировки на поверхностные свойства кварцевого стекла // Физика и химия обработки материалов. – 1984. – № 6. – С. 123 – 127.

120. Столен Р.Х., ди Паула Р.П. Одномодовые волоконные компоненты // ТИИЭР. – 1987. – т. 75. – № 11. – С. 66 – 82.

121. Томановская В.Ф. Физико-химические свойства и области применения фторсодержащих мономеров. – М.: НИИТЭХим, 1980. – 87 с.

122. Теумин И.И. Волноводы оптической связи, – М.: Связь, 1978.– 168 с.

123. Унгер Х.Г. Пленарные и волоконные оптические волноводы / Пер. с англ. под ред. В.В.Шевченко. – М.: Мир, 1980. – 656 с.

124. Фаловский В.Ф. Состояние и перспективы развития технологии производства оптических соединителей // Тез. докл. V Всесоюзной конф. "Волоконно-оптические системы передачи". Секция 6. Оптические соедини-

тели, ответивители, разветвители, переключатели и инструмент. – М.: 1988. – С. 2.

125. Фентон. Защита оптических волокон в местах их подключения к аппаратуре и в точках соединения волокон друг с другом // Электроника. – 1976. – № 16. – С. 48 – 50.

126. Фойгт И. Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла. – Л.: Химия, 1972. – 537 с.

127. Хинькис С.С. Прогнозирование работоспособности фторопласта-40 // Пластические массы. – 1981. – № 12. – С. 19 – 21.

128. Хэнерт М., Раушенбах Б. Исследование поверхностных слоев силикатных стекол // Физика и химия стекла. – 1983. – т. 9. – № 6. – С. 696 – 703.

129. Чегодаев Д.Д., Наумова З.К., Дунаевская Ц.С. Фторопласты / Под ред. Л.В.Черешкевича. – Л.: Госхимиздат, 1980. – 192 с.

130. Шевченко В.В. Плавные переходы в открытых волноводах. Введение в теорию / Под ред. Б.З.Каценеленбаума. – М.: Наука, 1969. – 192 с.

131. Элион Г., Элион Х. Волоконная оптика в системах связи / Пер. с англ. под ред. Е.М. Дианова. – М.: Мир, 1981. – 200 с.

132. Ястребова Л.С. Защита силикатных оптических стекол от химического разрушения. – М.: Оборонгиз, 1958. – 109 с.

133. Warren Hioki. Telecommunications, 2nd ed., Prentice Hal), 2000. – 501 p.

134. J. Hecht. Understanding Fiber Optics, Sams Publishing, 2003. – 477 p.

135. N. Suzuki, "PC Polishing Techniques", Seiko OFC Section Teiln-NR, 2001. – P.1 – 4.

136. M. Vukovic. "Analyze Connector Parameters to Realize High Performance", LIGHTWAVE, July, 2006. – P. 50 – 56.

137. Single Fiber Fusion Splicing, AN103, Corning Inc., 2004. – 15 p.

138. Frameworx – Value-Added Connector Module System, ADC Telecommunications, 891 7/2004. – 28 p.