

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ВЫВОДА И СБОРА ИЗЛУЧЕНИЯ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Ю. В. Малых, В. В. Шубин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Введение

При проведении мониторинга оптических волокон (ОВ) магистральных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) и разработке мультиплексоров ввода/вывода информации возникает необходимость отвода части мощности оптического сигнала через боковую поверхность одномодового волокна без разрыва передачи сигналов. При этом необходимо отвести достаточную для регистрации с коэффициентом ошибки (BER) не ниже 10^{-9} величину мощности сигнала (от минус 30 дБм на скорости 40 Гбит/с до минус 55 дБм на скорости 622 Мбит/с) при минимально вносимых в линию дополнительных потерях (0,005–0,1 дБ). При скоростях передачи характерных для современных ВОСП для регистрации сигналов используется схема приемника с квантовым ограничением. Схема состоит из волоконно-оптического усилителя, узкополосного оптического фильтра и приемного устройства на основе рпн-фотодиода [1]. Ввод излучения, выведенного через боковую поверхность ОВ, должен осуществляться на входной полюс оптического усилителя, который представляет собой стандартный оптический соединитель.

В научно-технической литературе описывается большое количество устройств вывода сигнала (УВС) с боковой поверхности ОВ на активные площадки фотодетекторов большого размера (миллиметр и более), которые ограничивают скорость передачи на уровне нескольких десятков Мбит/с. Известны также устройства типа «ответвитель – прищепка» [2], которые выводят излучение с изгиба волокна в одномодовое приемное волокно. Но эти устройства не имеют регулировки выводимой мощности и вносят в линию большие дополнительные потери (более 2 дБ). Подробных описаний устройств с малыми потерями и методик расчета их параметров в научно-технической литературе не найдено. Поэтому для решения поставленной задачи было разработано и исследовано собственное УВС. Для этого потребовалось:

- выбрать и рассчитать оптическую схему устройства;
- разработать методику расчета основных характеристик устройства: зависимостей дополнительных потерь и коэффициента передачи от коэффициента вывода излучения;
- по разработанной методике написать программу расчета характеристик устройства;

- с помощью программы провести расчетную оптимизацию параметров устройства;
- разработать и изготовить макет устройства по предложенной схеме;
- провести на макете экспериментальные исследования;
- провести верификацию разработанных методик.

Оптическая схема вывода и сбора излучения с боковой поверхности ОВ

Предлагаемое устройство состоит из двух симметричных частей, которые смещаются относительно друг друга. Оптическая схема каждой из частей представлена на рис. 1 [3]. В схеме зафиксировано положение и радиус изгиба, а регулировка осуществляется за счет изменения длины или, что то же самое, угла изгиба.

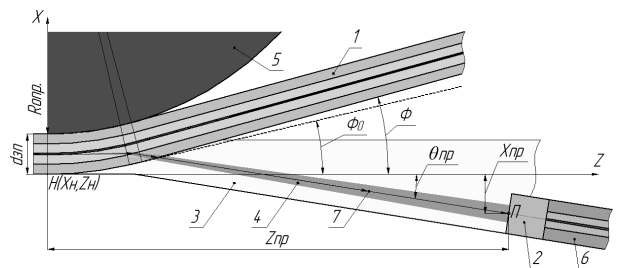


Рис. 1. Оптическая схема одной из симметричных частей УВС: 1 – ОВ; 2 – градиентная линза; 3 – иммерсионная среда; 4 – область передаваемого излучения; 5 – изгибающая оправа радиусом $R_{опр}$; 6 – приемное ОВ; 7 – вектор Умова–Пойтинга, показывающий направление распространения вышедшего излучения; Φ – угол изгиба волокна; Φ_0 – начальный угол изгиба

Вывод излучения из ОВ осуществляется с помощью переходных потерь, которые формируются на изгибе по малому радиусу $R_{опр}$ вокруг оправы 5. Изгиб осуществляется на начальный угол Φ_0 характерный тем, что вектор Умова – Пойтинга, выведенного из сердцевин ОВ излучения, достигает защитного покрытия. В этом случае излучение начинает интенсивно выходить за пределы оболочки ОВ. Φ_0 определяется по формуле, предложенной в патенте [4]:

$$\Phi_0 = \arccos [(R + r_c)/(R + r_{об})], \quad (1)$$

где R – радиус изгиба волокна; r_c – радиус сердцевины волокна; $r_{об}$ – радиус отражающей оболочки волокна.

Увеличивая угол изгиба ОВ, рис. 1, от Φ_0 до Φ , можно регулировать мощность выводимого излучения. Для выхода излучения за пределы защитного покрытия ОВ, область между волокном 1 и приемным оптическим устройством 2 (ПОУ) заполняется средой 3 с показателем преломления, близким к показателю преломления защитного покрытия ОВ. В качестве ПОУ используется отрезок одномодового ОВ 6 с градиентной линзой на переднем торце 2 и стандартным коннектором на втором конце [5].

Так как распространение и выход излучения из ОВ осесимметричны, то достаточно рассматривать двумерную задачу в плоскости XZ. Для обеспечения максимальной эффективности сбора излучения на приемное оптическое устройство необходимо определить координаты точки его размещения $P(X_{np}, Z_{np})$ относительно точки начала изгиба ОВ с координатами $H(X_n, Z_n)$, при этом, ось ПОУ должна совпадать с направлением вектора Умова – Пойтинга 7 излучения, выходящего на изгибе ОВ.

На рис. 2 представлена схема и основные параметры, необходимые для вывода формул расчета координат положения ПОУ. Масштаб на рис. 2 не соблюден, изображена только нижняя от оси часть ОВ. Расчеты будем проводить для наиболее распространенного одномодового ОВ типа SMF-28 фирмы «Corning» на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм (см. таблицу).

При изменении угла изгиба от Φ_0 до Φ меняется направление вектора Умова – Пойтинга 2. Юстировку ПОУ целесообразно осуществлять на среднее положение угла $\beta_0 = (\Phi_0 - \Phi)/2$ или осуществлять юстировку ПОУ для нескольких положений. С помощью законов геометрической оптики рассчитывается положение приемного оптического устройства, при котором координаты точки его оптимального положения $P(X_{np}, Z_{np})$ в точке 4 (X_4, Z_4), а угол расположения ПОУ относительно горизонтальной оси Z: $\theta_{np} = \beta_4$. Методика и результаты расчета подробно описаны в статье [3].

Параметры OBSMF-28 на рабочей длине волны $\lambda = 1,55$ мкм

Наименование структуры ОВ	Радиус, мкм		Показатель преломления, отн. ед.	
	r_c		n_c	
сердцевина	r_c	4,15	n_c	1,4504
оболочка	$r_{об}$	62,50	$n_{об}$	1,4447
первое защитное покрытие	r_{1zn}	90,00	n_{1zn}	1,4786
второе защитное покрытие	r_{2zn}	125,00	n_{2zn}	1,5300

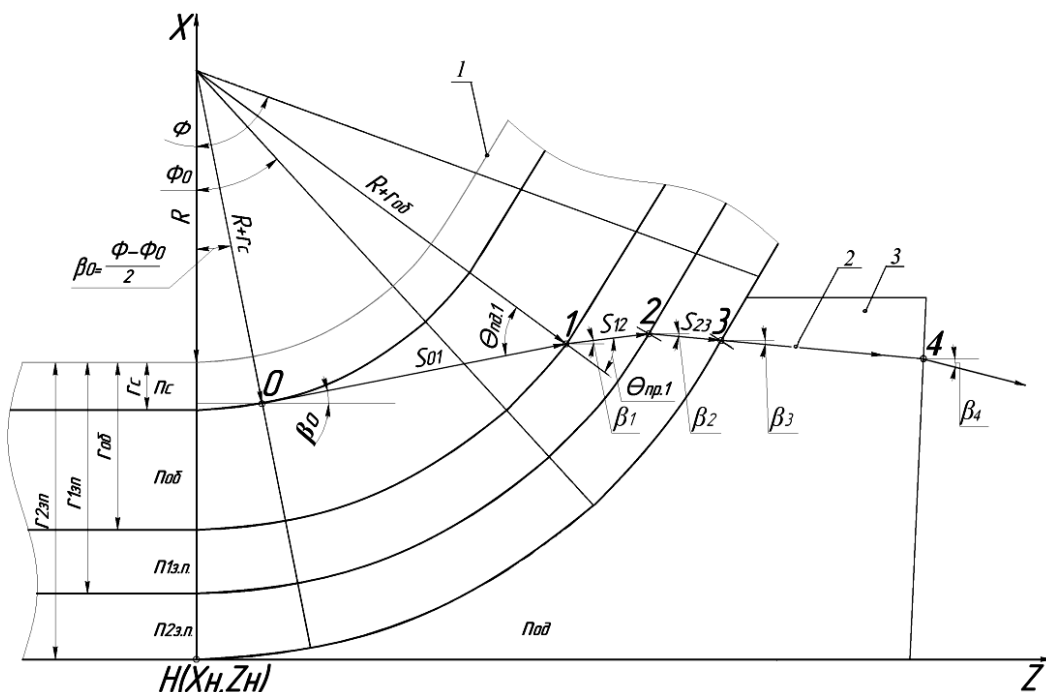


Рис. 2. Схема вывода излучения через боковую поверхность ОВ: 1 – ось оптического волокна, 2 – вектор Умова – Пойтинга, показывающий направление распространения вышедшего излучения, 3 – оптическая деталь, R – радиус изгиба ОВ, Φ_0 – начальный угол изгиба ОВ, Φ – угол изгиба ОВ

Методика расчета дополнительных потерь и коэффициента передачи

Анализ формул и методик расчета дополнительных потерь на изгибе ОВ, известных из литературы [6–8], показал, что ни одна из них не подходит для описания потерь на начальном участке изгиба ОВ. Поэтому была разработана собственная методика расчета.

Выход излучения из сердцевины ОВ рассматривается с использованием известного метода конформного отображения (МКО) [9–12], в котором изогнутое ОВ преобразуется в прямое, но с перекошенным профилем показателем преломления. На рис. 3 представлены профили показателей преломления в прямом и преобразованном ОВ.

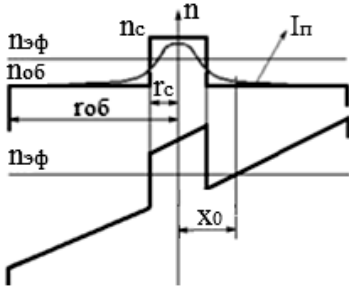


Рис. 3. Профили показателей преломления в прямом и преобразованном ОВ

Расстояние x_0 , на котором эффективный показатель преломления ОВ $n_{эф}$ становится равным преобразованному показателю преломления оболочки n_0 определяет часть интенсивности излучения I_n , которая выходит из сердцевины ОВ. Далее излучение распространяется по оболочке и при достижении границы раздела отражающая оболочка – первое защитное покрытие покидает ОВ. Таким образом, полные потери на начальном участке изогнутого ОВ предлагается вычислять по формуле, имеющей две составляющие:

$$A_d = -10 \lg \{ (1 - [0,5 - F(x_0/\omega_0)] \{ 1 - \exp[-K_\lambda R(\Phi - \Phi_0)^2] \}) \}, \quad (2)$$

где $10 \lg(1 - [0,5 - F(x_0/\omega_0)])$ – величина потерь излучения в сердцевине ОВ; $1 - \exp[-K_\lambda R(\Phi - \Phi_0)^2]$ – часть излучения, которая выходит за пределы отражающей оболочки на всей длине изгиба $R(\Phi - \Phi_0)$; $F(t)$ – интеграл Лапласа от аргумента $t = x_0/\omega_0$; ω_0 – радиус гауссова луча в сердцевине ОВ; K_λ – эмпирический коэффициент, зависящий от длины волны излучения (для $K_\lambda = 1,55 \text{ мкм} = 0,217 \text{ мкм}^{-1} \text{ рад}^{-2}$).

Коэффициент передачи излучения с боковой поверхности изогнутого ОВ ПОУ предлагается рассчитывать по формуле:

$$k_n = \eta \gamma \tau, \quad (3)$$

где η – эффективность ввода излучения в ПОУ; γ – коэффициент согласования по длине изгиба; τ – коэффициент пропускания оптических материалов и границ раздела сред.

Эффективность ввода определяется с помощью известного метода наложения интегралов гауссовых лучей [13]. Эффективность ввода излучения из изогнутого ОВ в приемное ОВ может быть определена как произведения эффективностей согласования гауссовых лучей на каждом из трех этапов преобразования по формуле:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3, \quad (4)$$

где η_1 – эффективность выхода излучения за отражающую оболочку ОВ; η_2 – эффективность согласования модовых пятен до и после выхода излучения за отражающую оболочку ОВ; η_3 – эффективность ввода излучения в градиентную линзу.

В соответствии с выражением из статьи [13], эффективность выхода излучения можно рассчитать по следующей формуле:

$$\eta_1 = 1 - k_0 \exp\{-2x_\phi^2/(r_{об}^2 + \omega_\phi^2)\}, \quad (5)$$

где $k_0 = 4/(r_{об}/\omega_\phi + \omega_\phi/r_{об})^2$, $r_{об}$ – радиус оболочки ОВ, x_ϕ геометрически определяется по рис. 4, ω_ϕ – радиус гауссова луча, при изгибе ОВ на угол Φ :

$$\omega_\phi^2 = \omega_0^2 \{ 1 + [(\lambda R \text{tg} \Phi)/(\pi \omega_0^2)]^2 \}. \quad (6)$$

Для дальнейшего эффективного сбора, вышедшего из оболочки излучения в приемную градиентную линзу, требуется из вышедшего излучения выделить ту часть, которая сможет попасть в апертуру градиентной линзы. Так как апертура градиентной линзы представляет собой телесный угол, в поперечном сечении которого круг, рассчитаем эффективный радиус модового пятна излучения вышедшего на изгибе по формуле:

$$\omega_{эф} = [(\omega_\phi + x_\phi - r_{об}) \sin(90 - \Phi)]/2. \quad (7)$$

где Φ – угол изгиба ОВ, $r_{об}$ – радиус оболочки ОВ, $\omega_{эф}$, x_ϕ и ω_ϕ представлены рис. 4.

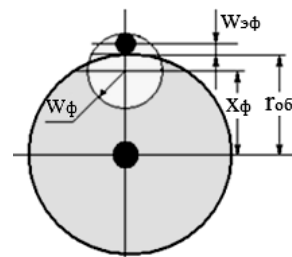


Рис. 4. Выход излучения за пределы отражающей оболочки

Эффективность ввода вышедшего за отражающую оболочку ОВ излучения в градиентную линзу η_3 определяется по формулам расчета эффективности [13]:

$$\eta_3 = k \exp\{-k \{ x^2(1/\omega_1^2 + 1/\omega_{эф}^2)/2 + \pi^2 \theta^2 \times [\omega_{эф}^2(z + \omega_1^2)/2\lambda^2 - x\theta z/\omega_{эф}^2] \}, \quad (9)$$

где ω_1 – радиус гауссова луча ПОУ с градиентной линзой на ее рабочем расстоянии; x – радиальное смещение вектора Умова – Пойтинга выходящего гауссова луча и оптической оси ПОУ, мкм; z – продольное смещение вектора Умова – Пойтинга выходящего гауссова луча и оптической оси ПОУ, мкм;

θ – угловое рассогласование вектора Умова – Пойтинга выходящего гауссова луча и оптической оси ПОУ, град; λ – рабочая длина волны, мкм.

$$k = 4\omega_{\text{эф}}^2 \omega_1^2 / [(\omega_{\text{эф}}^2 + \omega_1^2)^2 + \lambda^2 z^2 / \pi^2]; \quad (10)$$

$$\omega_{\text{эф}}^2(z) = \omega_{\text{эф}}^2 [1 + [\lambda z / (\pi \omega_{\text{эф}}^2)]^2]. \quad (11)$$

Коэффициент согласования по длине изгиба определяется как часть излучения, выведенного на длине изгиба, которая захватывается апертурой ПОУ и определяется по формуле:

$$\gamma = 2\omega_{\text{эф}} / \Phi R, \quad (12)$$

где $\omega_{\text{эф}}$ – эффективный радиус гауссова луча, мкм; Φ – угол изгиба, рад; R – радиус изгиба, мкм.

Коэффициент пропускания излучения из сердцевинки ОВ на выходной оптический соединитель приемного ОВ определяется как коэффициентами пропускания излучения на каждой оптической среде, так и коэффициентами пропускания излучения на границах раздела сред с разными показателями преломления. Коэффициент вычисляется как произведение:

$$\tau = \tau_{n1} \cdot \tau_{n2} \cdot \tau_{n3} \cdot \tau_{od} \cdot \tau_{n4} \cdot \tau_{gl} \cdot \tau_{oc}, \quad (13)$$

где τ_{n1} – коэффициент пропускания границы раздела «оболочка – первое защитное покрытие»; τ_{n2} – коэффициент пропускания границы раздела «первое защитное покрытие – второе защитное покрытие»; τ_{n3} – коэффициент пропускания границы раздела «второе защитное покрытие – оптическая деталь»; τ_{od} – коэффициент пропускания оптической детали; τ_{n4} – коэффициент пропускания границы раздела «оптическая деталь – воздух»; τ_{gl} – коэффициент пропускания градиентной линзы; τ_{oc} – коэффициент пропускания выходного оптического соединителя ОВ.

С помощью формулы Френеля и формулы для пропускания оптических материалов все коэффициенты пропускания легко могут быть определены [15].

После определения коэффициента дополнительных потерь A_d по формуле (2) и коэффициента передачи k_n по формуле (3), можно рассчитать коэффициент вывода по следующей формуле [1]:

$$A_e = 10 \lg [k_n (1 - 10^{-0.1(2A_d)})]. \quad (14)$$

Оптимизация параметров передачи излучения

На основании предложенных методик расчета была написана программа для расчета характеристик УВС. На рис. 5 представлены расчетные графики зависимости дополнительных потерь и коэффициента передачи от коэффициента вывода для разных радиусов изгиба ОВ. Расчет проводился для ОВ SMF-28 с параметрами из таблицы. Диапазон дополнительных потерь $2Ad$ составляет от 0,001 до 0,05 дБ. Оптимальная юстировка ПОУ предполагалась для каждого угла изгиба ОВ.

Анализ графиков говорит о том, что получить максимальные значения коэффициентов передачи при всех значениях внесенных дополнительных потерь возможно при радиусах изгиба 1,5 мм или 2 мм. При этом, следует учитывать то, что чем меньше радиус изгиба ОВ, тем больше начальный угол изгиба Φ_0 , который рассчитывается по формуле (1). Большому начальному углу изгиба будут соответствовать большие начальные потери. Поэтому оптимальным радиусом изгиба следует считать 2 мм. На рис. 6 представлена расчетная зависимость коэффициента дополнительных потерь от угла изгиба ОВ при радиусе изгиба 2 мм. Из рис. 6 видно, что для диапазона потерь от 0,001 до 0,1 дБ требуется изменять угол изгиба на $1,3^\circ$ (от $12,9^\circ$ до $14,2^\circ$).

На рис. 7 представлены расчетные зависимости коэффициента передачи от дополнительных потерь при радиусе изгиба 2 мм.

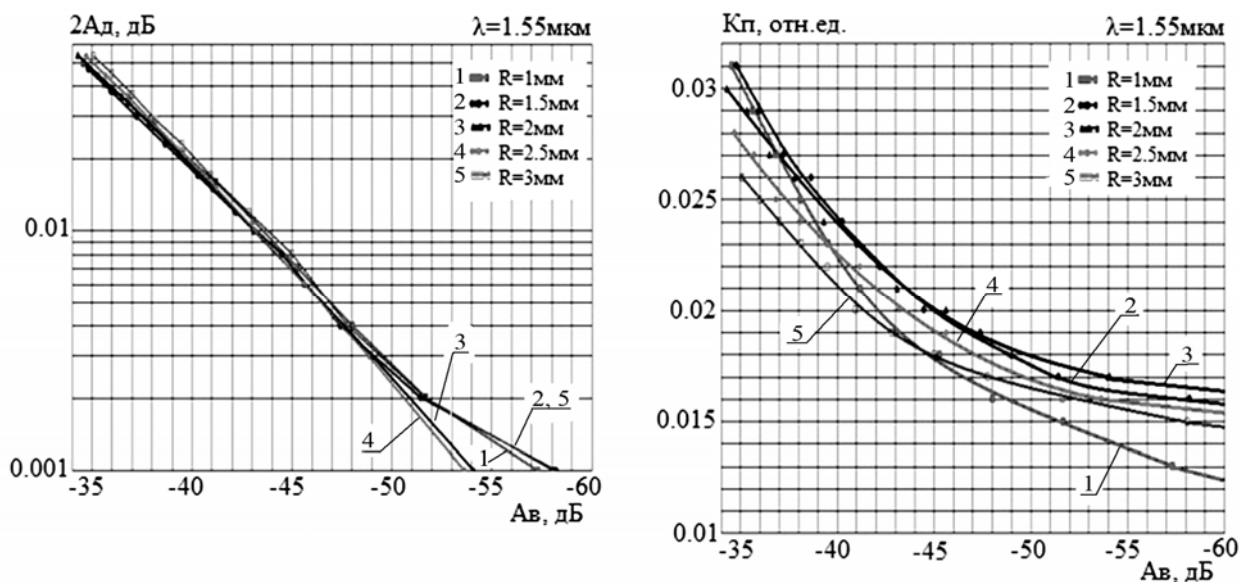


Рис. 5. Характеристики УВС для различных радиусов изгиба

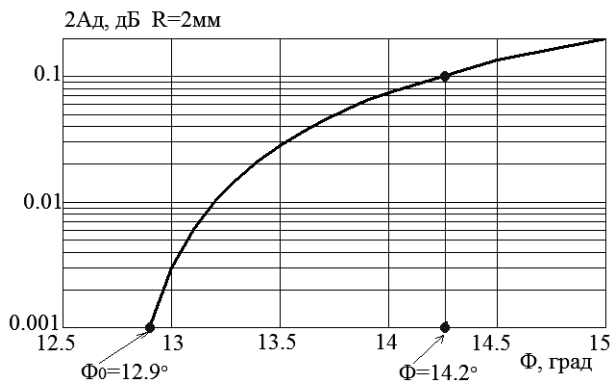


Рис. 6. Зависимость дополнительных потерь от угла изгиба

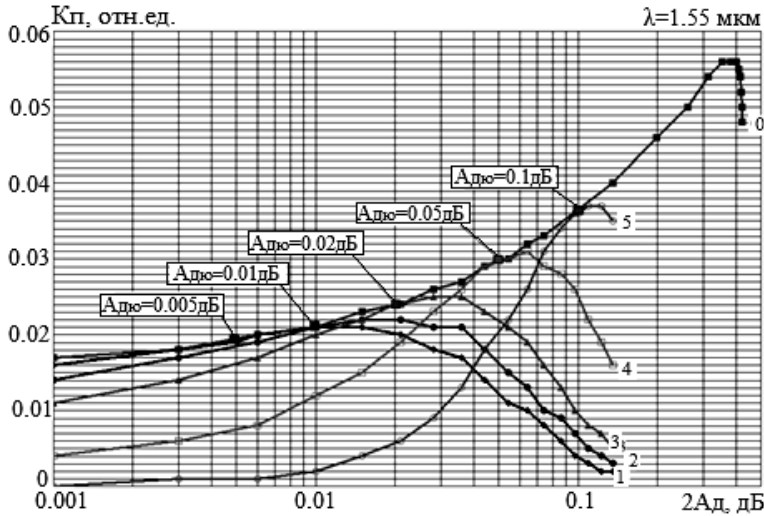


Рис. 7. Зависимости коэффициента передачи от дополнительных потерь: 0 – юстировка ПОУ при каждом значении дополнительных потерь; 1 – юстировка ПОУ при $A_{до} = 0,005$ дБ; 2 – при $A_{до} = 0,01$ дБ; 3 – при $A_{до} = 0,02$ дБ; 4 – при $A_{до} = 0,05$ дБ; 5 – при $A_{до} = 0,1$ дБ

Из рис. 7 следует, что максимальных значений коэффициента передачи можно добиться только путем юстировки ПОУ при каждом значении внесенных дополнительных потерь (кривая 0). При работе в узком диапазоне дополнительных потерь можно проводить юстировку для какого-либо одного значения.

Верификация расчетных данных

Для подтверждения правильности разработанной методики расчета были проведены экспериментальные исследования. Для этого был разработан и изготовлен макет УВС. С использованием макета была собрана экспериментальная установка, состав и структурная схема которой приведены на рис. 8. В установке использованы компоненты, для которых проводился расчет: ОВ – SMF-28, ПОУ – оптический зонд Miniature OCT Fiber Probe фирмы Agiltron [5], оптическая деталь (ОД) 19 из стекла BK8, у которого показатель преломления на $\lambda = 1,55$ мкм равен 1,53 [14]. В конструкции устройства использованы детали, размеры которых определены расчетными данными: радиус оправы 15 равен 2 мм; входная грань

ОД 19 задает начальный угол изгиба ОВ около 13° ; входная грань призмы 21 располагается в точке, с координатами, рассчитанными по методике и схеме, приведенной на рис. 2.

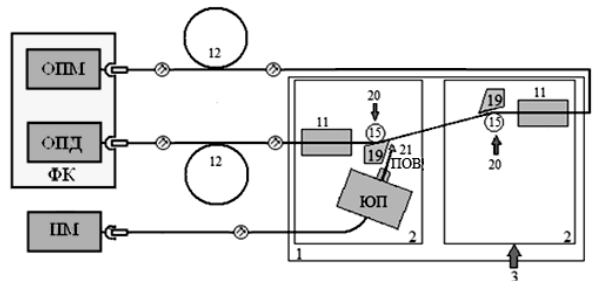


Рис. 8. Состав и структурная схема экспериментальной установки: ФК – фрейм контроллер AQ 2212; ОПД – оптический передатчик AQ 2200-131 ($\lambda = 1,55$ мкм); ОПМ – оптический приемник AQ 2200-211; ИМ – измеритель мощности FOD1204; ЮП – юстировочная подвижка; ПОВ – приемное оптическое волокно; 1 – основание; 2 – пластина; 3 – подвижка; 11 – прижим ОВ; 12 – оптическое волокно; 15 – оправы; 19 – оптическая деталь; 21 – призма; 20 – прижим втулки

В ОВ 12, рис. 8, от оптического передатчика ОПД вводился постоянный сигнал мощностью $W_{онд}$. Угол изгиба ОВ задавался с помощью линейного перемещения подвижкой 3 с последующим пересчетом в угол изгиба. Для каждого задаваемого угла изгиба измерялись мощности на входе $W_{онд}$ и выходе $W_{онм}$ изогнутого ОВ – 12 с помощью оптического приемника ОПМ, дБм. Мощность выведенного сигнала на выходе ПОУ измерялась с помощью измерителя мощности ИМ, дБм.

Было проведено десять серий измерений. По измеренным величинам мощностей вычислялись параметры изогнутого ОВ в зависимости от угла изгиба:

$A_6(\Phi)$, дБ – коэффициент вывода от угла изгиба по формуле:

$$A_6(\Phi) = W_{им}(\Phi) - W_{онд}, \quad (15)$$

$2A_\delta(\Phi)$, дБ – коэффициент дополнительных потерь на двух изгибах от угла изгиба:

$$2A_\delta(\Phi) = W_{онм} - W_{онм}(\Phi), \quad (16)$$

$k_n(\Phi)$, отн. ед. – коэффициент передачи бокового излучения с изгиба ОВ на вход ИМ:

$$k_n(\Phi) = 10^{-0,1A_6(\Phi)/(1-10^{-0,1[2A_\delta(\Phi)])}. \quad (17)$$

По полученным результатам были построены экспериментальные характеристики, которые приведены на рис. 9 и рис. 10.

На рис. 9 и рис. 10 разнотонными квадратами отмечены экспериментальные результаты каждой из

десяти серий (один тон для одной серии). Кривые 1 и 2 построены как верхняя и нижняя огибающие экспериментальных данных. Кривая 3 построена по данным расчета по разработанной методике.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- расчетная зависимость $2A_\delta$ от Φ имеет форму несколько отличную от экспериментальных результатов (рис. 9). Это связано, вероятно, с неточностью задания формулы расчета потерь.

- имеется большой статистический разброс экспериментальных результатов. Это, вероятно, обусловлено нестабильностью прижима ОВ к оптической детали, что вызывает появление нестабильного воздушного зазора, который в расчетах не учитывается. Кроме того, замечен люфт прижимного механизма, который также влияет на силу и геометрию прижима. Различия в k_n и A_δ при одних и тех же A_6 в разных сериях измерений достигают от 3 до 5–7 раз.

- расчетные зависимости $2A_\delta$ и k_n от A_6 расположены вблизи нижней и верхней границ экспериментальных данных соответственно. Нижняя граница зависимости $2A_\delta = f(A_6)$ определяет максимальный уровень выводимой мощности при минимальных потерях (лучший результат), а верхняя граница зависимости $k_n = f(A_6)$ определяет максимальную эффективность сбора потерянного на изгибе излучения (лучший результат).

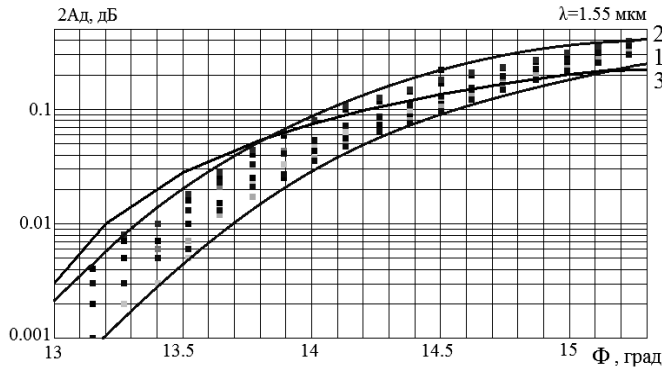


Рис. 9. Зависимости дополнительных потерь от угла изгиба ОВ: 1 – нижняя граница экспериментальных данных, 2 – верхняя граница экспериментальных данных, 3 – расчетная кривая при условии идеальной юстировки приемного ОВ

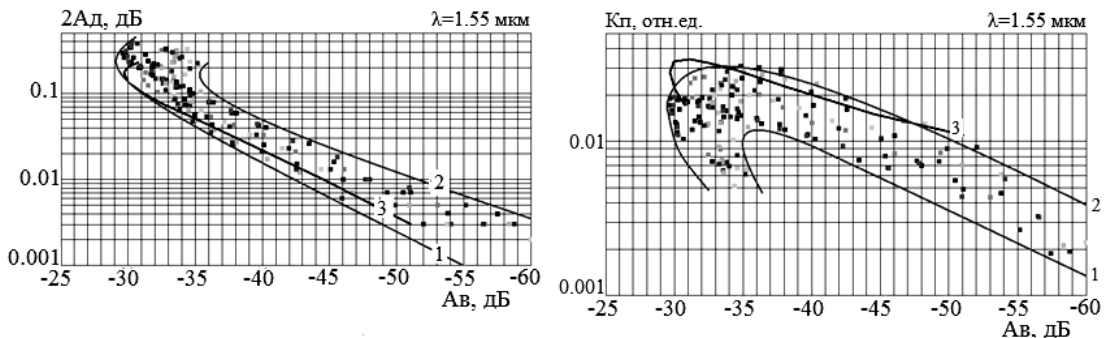


Рис. 10. Зависимости коэффициентов дополнительных потерь и передачи от коэффициента вывода: 1 – нижняя граница экспериментальных данных, 2 – верхняя граница экспериментальных данных, 3 – расчетная кривая при условии идеальной юстировки ПОУ

Заключение

Предложена оптическая схема УВС сигнала с боковой поверхности ОВ на ПОУВ в виде одномодового оптического волокна с использованием градиентной линзы на входе. Разработана методика расчета оптимального положения ПОУ относительно плоскости начала изгиба. Для предложенной схемы разработаны методики расчета дополнительных потерь от угла изгиба и коэффициента передачи оптического излучения с боковой поверхности изогнутого ОВ на выходной полюс ПОУ. Проведена верификация расчетных методик. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает достаточно хорошее совпадение результатов. Результаты работы могут быть использованы при проектировании УВС различного назначения.

Результаты работы опубликованы в журнале ВАНТ [3], также подготовлены материалы еще двух статей в ВАНТ: «Методика расчета потерь на начальном участке изогнутого одномодового оптического волокна» и «Методика расчета коэффициента передачи излучения из сердцевины изогнутого одномодового оптического волокна в приемное волокно».

Литература

1. Шубин В. В. Волоконно-оптические системы и информационная безопасность. ГРОЦ. – С-Петербург: Изд. «Ива», 2006.

2. КБ «Волоконно-оптических приборов». Ответвление – прищепка FOD-5503. [Electronic resource]. Mode of access: www.fods.com.

3. Малых Ю. В., Шубин В. В. Метод расчета эффективности передачи излучения с боковой поверхности изогнутого одномодового оптического волокна на приемное оптическое устройство. // ВАНТ. Серия математическое моделирование физических процессов. 2016, Вып.1, С. 69–79.

4. US Patent 4889403. Distribution optical fiber tap. 1989. [Electronic resource]. Mode of access: patents.com.

5. Оптические зонды Miniature OCT Fiber Probe фирмы Agiltron. [Electronic resource]. Mode of access: www.aligtron.com.

6. Gambling W. A., Matsumura H., Ragdale C. M. and Sammut R. A. Measurement of radiation loss in curved single-mode fibres. Microwave, optics and acoustics. July, 1978. Vol. 2, No 4, P. 134–140.

7. Снайдер Дж. Лав Теория оптических волноводов. – М.: «Радио и связь», 1987.

8. Optical A. Communication Systems. Bending loss and reliability in optical fibres. School of electrical and communications engineering.

9. Iodicicco A., Paladino D., Moccia M., Quero G., Campopiano S., Bock W. j., Cusano A. Mode coupling and field distribution in sub-mm permanently bent single mode optical fibers. Optical & Laser Technology, 47 (2013), 292–304.

10. Schulze C., Lorenz A., Flamm D., Hartung A., Shroter S., Bartelt H., Duparre M. Mode resolved bend loss in few-mode optical fibers. Optics express. Vol. 21, No 3, P. 3170–3181, 2013.

11. Аксенов В. А., Волошин В. В., Воробьев И. Л., Иванов Г. А., Исаев В. А., Колосовский А. О., Моршнева С. В., Чаморовский Ю. К. Потери в одномодовых волоконных световодах на однократных изгибах по малому радиусу. Прямоугольный профиль показателя преломления // Радиотехника и электроника. 2004, Т. 49, № 6, С. 734–742.

12. Моршнева С. В. Оптические свойства изогнутых волоконных световодов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова (г. Фрязино, Московской обл.). 2009.

13. Saruwatary M., Nawata K. Semiconductor Laser to Single-Mode fiber Coupling. Applied Optics, 11, 18, 1979, P. 1847–1856.

14. ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. – М.: Изд-во стандартов, 1978.

15. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. – М.–Ленинград: «Машиностроение», 1966.