

УДК 628.953

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ СЕРДЦЕВИНЫ ИЗОГНУТОГО ОДНОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В ПРИЕМНОЕ ВОЛОКНО

Ю. В. Малых, В. В. Шубин
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Представлена методика расчета коэффициента передачи излучения из сердцевины изогнутого одномодового оптического волокна в приемное оптическое волокно. В методике расчета учитываются эффективность взаимодействия гауссовых лучей (интегралы наложения), пропускание излучения всеми оптическими компонентами и зависимость потерь излучения от длины изгиба. Проведен расчет коэффициента передачи в зависимости от угла изгиба и коэффициента вывода для ОВ типа SMF-28 по разработанной методике. Полученные расчетные результаты сравниваются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: изогнутое одномодовое оптическое волокно, гауссовы лучи, радиус модового пятна, коэффициент передачи излучения через боковую поверхность.

Введение

При проведении мониторинга оптических волокон (ОВ) магистральных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), 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 мощность сигнала при минимально вносимых в линию дополнительных потерях. В современных высокоскоростных ВОСП (со скоростями передачи 0,5 Гбит/с и более) для регистрации маломощных сигналов наиболее эффективна схема с использованием волоконно-оптического усилителя, узкополосного оптического фильтра и приемного устройства на основе pin-фотодиода [1]. Ввод выведенного через боковую поверхность излучения осуществляется на входной полюс оптического усилителя, который представляет собой стандартный одномодовый оптический соединитель.

Для разработки эффективных устройств ввода и сбора излучения с минимальными дополнительными потерями необходимо:

- выбрать и рассчитать оптические схемы устройств;
- разработать методику расчета основных характеристик устройств: зависимости потерь излучения (далее просто *потери*) на изгибе оптического волокна от угла изгиба при постоянном радиусе изгиба и зависимости коэффициента передачи бокового излучения на выходной оптический соединитель приемного ОВ от отводимой мощности.

В работе [2] были представлены результаты расчета оптимальной схемы вывода излучения через боковую поверхность изогнутого ОВ с использованием прижима изгиба волокна к оптической детали с показателем преломления, равным показателю преломления защитного покрытия ОВ. Сбор излучения с боковой поверхности изогнутого ОВ на приемное одномодовое ОВ осуществлялся с помощью градиентной линзы. В [3] предложена и апробирована методика и программа расчета дополнительных потерь в изогнутом ОВ в зависимости от угла изгиба. Следующим этапом работы является определение возможности передачи выведенного излучения на приемное одномодовое ОВ.

Как уже отмечалось в [2], параметром, характеризующим сбор выведенного излучения, явля-

ется коэффициент передачи бокового излучения на выходной оптический соединитель приемного ОВ. Коэффициент передачи численно равен отношению мощности на выходном оптическом соединителе приемного ОВ к мощности, потерянной в ОВ при изгибе. В данной работе представлена методика расчета коэффициента передачи излучения из сердцевины изогнутого одномодового ОВ на выход приемного ОВ.

Коэффициент передачи излучения через боковую поверхность изогнутого волокна

На рис. 1 приведена разработанная ранее (см. [2]) оптическая схема передачи излучения с изогнутого одномодового ОВ на приемное ОВ. На схеме $d_{\text{зп}}$ — диаметр защитного покрытия ОВ; θ_s — угол изгиба ОВ; θ_{min} — начальный

угол изгиба ОВ; $Z_{\text{пр}}$, $X_{\text{пр}}$ — координаты градиентной линзы (точка П); $\theta_{\text{пр}}$ — угол расположения градиентной линзы относительно оси Z.

В качестве градиентной линзы (2) и приемного ОВ (6) удобно использовать оптические зонды Miniature OCT Fiber Probe фирмы Agiltron [4], внешний вид которых приведен на рис. 2, а, значения основных параметров — в табл. 1.

Вышедшее на изгибе из сердцевины ОВ излучение начинает распространяться по оболочке ОВ. Известно [5], что при распространении излучения по оболочке радиус гауссова луча (радиус модового пятна) увеличивается. Квадрат радиуса гауссова луча при изгибе ОВ на угол θ_s составит

$$w_{\phi}^2 = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda R \operatorname{tg} \theta_s}{\pi w_0^2} \right)^2 \right], \quad (1)$$

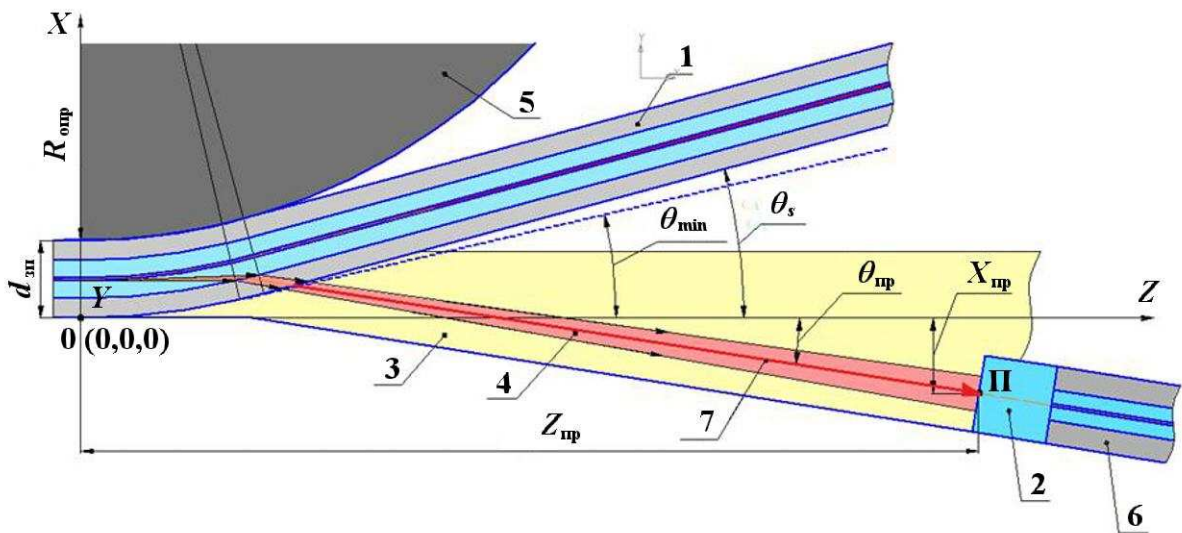


Рис. 1. Схема передачи излучения на приемное ОВ: 1 — ОВ; 2 — градиентная линза; 3 — иммерсионная среда; 4 — пучок излучения, выходящий на изгибе; 5 — изгибная оправа радиусом $R_{\text{опр}}$; 6 — приемное ОВ; 7 — направление распространения вышедшего излучения (вектор Умова–Пойтинга)

Таблица 1

Параметры оптических зондов Miniature OCT Fiber Probe в воздухе

Параметр	Длина волны	
	1,31 мкм	1,55 мкм
Диаметр коллиматора OD , мкм	250	250
Рабочий отрезок WD , мкм	2 000	2 000
Диаметр входного зрачка ($2w$), мкм	100	100
Диаметр перетяжки гауссова пучка на расстоянии WD ($2w_1$), мкм	40	40
Угол расходимости гауссова пучка (2θ), °	1,2	1,4
Потери (без учета разъёмного соединителя), дБ	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$

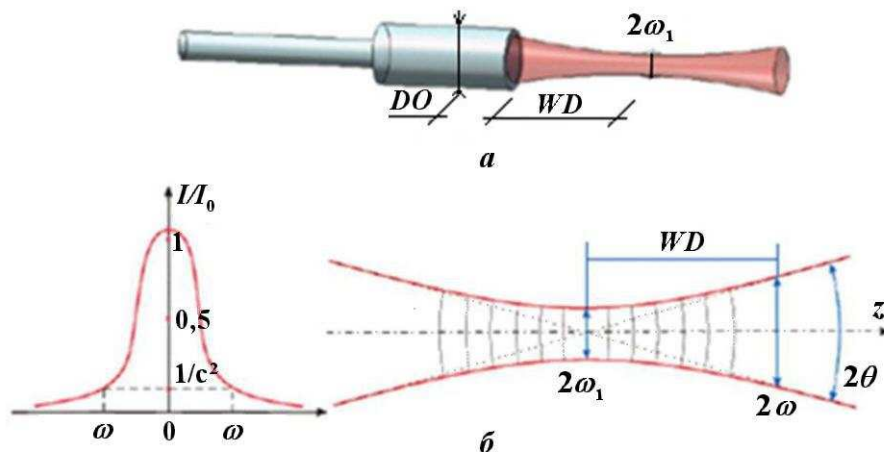


Рис. 2. Внешний вид и параметры гауссова луча оптического зонда Miniature OCT Fiber Probe: *a* — приемное оптическое устройство; *б* — распределение интенсивности в приемном оптическом устройстве

где w_0 — радиус гауссова луча в сердцевине ОВ; λ — рабочая длина волны; R — радиус изгиба ОВ.

Радиус гауссова луча в сердцевине ОВ вычисляется по известной формуле [5]

$$w_0 = \rho \left(0,65 + \frac{1,619}{V^{1,5}} + \frac{2,879}{V^6} \right).$$

Здесь ρ — радиус сердцевины ОВ; V — волновое число, определяемое по формуле

$$V = \frac{\lambda_{отс}}{\lambda} V_{отс};$$

$\lambda_{отс}$ — длина волны отсечки; $V_{отс}$ — волновое число отсечки, которое зависит от показателя m в степенной функции, описывающей профиль показателя преломления в сердцевине ОВ по формуле

$$n(x) = n_c - \Delta n (x/\rho)^m \quad \text{для} \quad x < \rho,$$

и представляет собой решение волнового уравнения. В табл. 2 приведено решение волнового уравнения $V_{отс}$ для профилей показателей преломления с различными степенями m [6].

Смещение вектора Умова—Пойтинга гауссова луча от оси изогнутого ОВ можно определить по формуле

$$x_\phi = R \left(\frac{1}{\cos \theta_s} - 1 \right). \quad (2)$$

При достижении излучением границы раздела *отражающая оболочка — защитное покрытие* происходит отражение и преломление излучения. Преломленная часть распространяется по защитному покрытию и оптической среде

Таблица 2

Решение волнового уравнения для профилей показателей преломления с различными степенями m

m	$V_{отс}$
∞	2,405
7	2,753
4	3,001
3	3,182
2	3,520
1	4,386

до градиентной линзы (2 на рис. 1), которая фокусирует излучение на входной торец приемного ОВ. При этом для эффективного выхода излучения показатели преломления защитного покрытия и оптической среды на рабочей длине волны должны быть одинаковыми. В предложенной оптической схеме в качестве иммерсионной среды выбрана деталь из оптического стекла марки БК8, у которого показатель преломления на длине волны $\lambda = 1550$ нм равен 1,53 [7].

Коэффициент передачи излучения из сердцевины изогнутого ОВ в приемное ОВ определяется эффективностью ввода излучения из изогнутого ОВ в приемное ОВ (η), коэффициентом согласования излучения по длине изгиба (γ) и коэффициентом пропускной способности оптической цепи при переходе из сердцевины ОВ на выходной оптический соединитель приемного ОВ (τ). Таким образом, коэффициент передачи может быть определен как произведение

$$k_{п} = \eta\gamma\tau. \quad (3)$$

Расчет эффективности ввода излучения из изогнутого ОВ в приемное ОВ

Ввод излучения из изогнутого ОВ в приемное ОВ происходит в несколько этапов. Эффективность ввода излучения из изогнутого ОВ в приемное ОВ может быть определена как произведение эффективностей: 1) вывода излучения за отражающую оболочку ОВ (η_1); 2) согласования гауссовых лучей до и после вывода излучения за отражающую оболочку ОВ (η_2); 3) ввода излучения в градиентную линзу (η_3), т. е.

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

Эффективности вывода и ввода удобно рассчитывать с использованием интегралов наложения гауссовых лучей, которые были предложены авторами работы [5] для определения эффективности ввода излучения в волокно от лазерных источников излучения.

Эффективность вывода излучения за отражающую оболочку ОВ (η_1) главным образом зависит от соотношения радиуса модового пятна на изгибе ОВ (w_ϕ) и радиуса отражающей оболочки (r). В соответствии с формулой из [5] эту эффективность можно рассчитать следующим образом:

$$\eta_1 = 1 - k_0 \exp\left(-\frac{2x_\phi^2}{r^2 + w_\phi^2}\right), \quad (5)$$

где $k_0 = 4/(r/w_\phi + w_\phi/r)^2$.

Рассчитаем η_1 для ОВ типа SMF-28 с параметрами $r = 62,5$ мкм, $\lambda = 1,55$ мкм и начальной настройки градиентной линзы на угол изгиба $\theta_s = 14^\circ$. Значения x_ϕ и w_ϕ рассчитываются по формулам (1) и (2). Результаты расчета η_1 в соответствии с формулой (5) приведены в табл. 3.

Для дальнейшего эффективного сбора излучения, вышедшего из оболочки, в приемную градиентную линзу требуется выделить из него ту

часть, которая сможет попасть в апертуру градиентной линзы. Так как апертура градиентной линзы представляет собой телесный угол, поперечным сечением которого является круг, рассчитаем эффективный радиус модового пятна излучения, вышедшего на изгибе, по формуле

$$w_{\text{эф}} = \frac{1}{2} (w_\phi + x_\phi - r) \sin(90^\circ - \theta_s). \quad (6)$$

На рис. 3 показан эффективный радиус модового пятна выходящего излучения по отношению к другим параметрам в поперечном сечении ОВ.

Эффективность согласования модовых пятен до и после вывода излучения за отражающую оболочку ОВ может быть определена по формуле, полученной из общей формулы эффективности [5] после подстановки параметров в соответствии с рис. 3:

$$\eta_2 = \frac{4}{\left(\frac{w_{\text{эф}}}{w_\phi} + \frac{w_\phi}{w_{\text{эф}}}\right)^2}. \quad (7)$$

В табл. 4 приведены результаты расчета эффективности η_2 по формулам (6), (7) для ОВ типа SMF-28 с параметрами $r = 62,5$ мкм, $\lambda = 1550$ нм и начальной настройки оси градиентной линзы на угол изгиба $\theta_s = 14^\circ$.

Эффективность ввода излучения, вышедшего за отражающую оболочку ОВ, в градиентную линзу (η_3) определяется по формулам расчета эффективности из [5]:

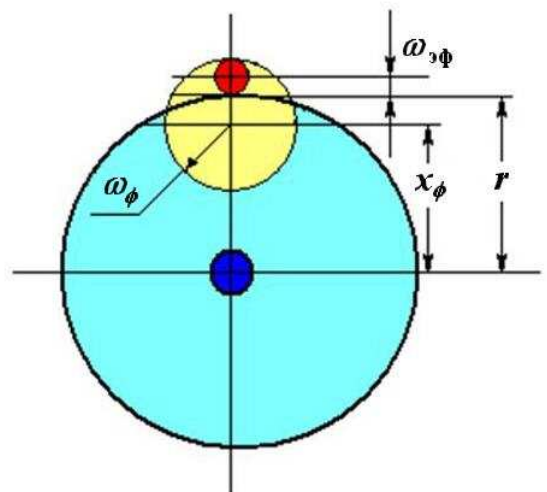


Рис. 3. Выход излучения за пределы отражающей оболочки

Таблица 3

Результаты расчета эффективности вывода излучения за отражающую оболочку ОВ (η_1)

$\theta_s, ^\circ$	$x_\phi, \text{мкм}$	$w_\phi, \text{мкм}$	$k_0, \text{отн. ед.}$	$\eta_1, \text{отн. ед.}$
13,0	52,6	46,0	0,91	0,64
13,5	56,8	48,9	0,93	0,67
14,0	61,2	49,6	0,95	0,71
14,5	65,8	51,4	0,96	0,74
15,0	70,6	53,3	0,97	0,78

Таблица 4

Результаты расчета эффективности согласования модовых пятен до и после вывода излучения за отражающую оболочку ОВ (η_2)

$\theta_s, ^\circ$	$w_{\text{эф}}, \text{мкм}$	$w_\phi, \text{мкм}$	$\eta_2, \text{отн. ед.}$
13,0	17,6	46,0	0,45
13,5	20,5	47,8	0,52
14,0	23,5	49,6	0,60
14,5	26,5	51,4	0,66
15,0	29,6	53,3	0,72

$$\eta_3 = k \exp \left(-k \left[\frac{x^2}{2} \left(\frac{1}{w_1^2} + \frac{1}{w_{\text{эф}}^2} \right) + \frac{\pi^2 \theta^2 (w_{\text{эф}}^2(z) + w_1^2)}{2\lambda^2} - \frac{x\theta z}{w_{\text{эф}}^2} \right] \right), \quad (8)$$

где w_1 [мкм] — радиус гауссова луча приемного ОВ с градиентной линзой на расстоянии WD (см. табл. 1 и рис. 2); x, z [мкм] — радиальное и продольное смещения вектора Умова—Пойтинга выходящего гауссова луча относительно оптической оси приемного ОВ; θ [°] — угловое рассогласование вектора Умова—Пойтинга выходящего гауссова луча и оптической оси приемного ОВ; k и $w_{\text{эф}}(z)$ вычисляются по формулам

$$k = \frac{4w_{\text{эф}}^2 w_1^2}{(w_{\text{эф}}^2 + w_1^2)^2 + \left(\frac{\lambda z}{\pi}\right)^2}; \quad (9)$$

$$w_{\text{эф}}^2(z) = w_{\text{эф}}^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_{\text{эф}}^2}\right)^2 \right]. \quad (10)$$

Таким образом, для ОВ типа SMF-28 с $\lambda = 1550$ нм при идеальной юстировке оптической оси приемного ОВ с вектором Умова—Пойтинга выведенного излучения (т. е. $z = 0, x = 0$) и при $w_1 = 20$ мкм (см. табл. 1) значение η_3 определяется формулой

$$\eta_3 = k \exp \left(-k \frac{\pi^2 \theta^2 (w_{\text{эф}}^2(z) + w_1^2)}{2\lambda^2} \right). \quad (11)$$

Результаты расчета значения η_3 по формуле (11) при разных углах отклонения θ относительно начальной настройки приемного ОВ на угол изгиба ОВ $\theta_s = 14^\circ$ приведены в табл. 5.

Суммируя результаты расчетов по формулам (5)—(11), получаем по формуле (3) эффективность ввода излучения из изогнутого ОВ в приемное ОВ (табл. 6).

Таблица 5

Результаты расчета эффективности ввода излучения в градиентную линзу (η_3)

$\theta_s, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$w_{\text{эф}}^2, \text{мкм}^2$	$w_1^2, \text{мкм}^2$	$k, \text{отн. ед.}$	$\eta_3, \text{отн. ед.}$
13,0	−1	310	400	0,98	0,64
13,5	−0,5	420	400	1,00	0,88
14,0	0	552	400	0,98	0,98
14,5	0,5	702	400	0,92	0,80
15,0	1	876	400	0,86	0,43

Таблица 6

Результаты расчета эффективности ввода излучения (η)

$\theta_s, ^\circ$	$\eta_1, \text{отн. ед.}$	$\eta_2, \text{отн. ед.}$	$\eta_3, \text{отн. ед.}$	$\eta, \text{отн. ед.}$
13,0	0,64	0,45	0,64	0,18
13,5	0,67	0,52	0,88	0,31
14,0	0,71	0,60	0,98	0,41
14,5	0,74	0,66	0,80	0,40
15,0	0,78	0,72	0,43	0,24

Расчет коэффициента согласования излучения по длине изгиба

Коэффициент согласования по длине изгиба γ показывает отношение части излучения, которая захватывается апертурой градиентной линзы, к излучению, которое теряется по всей длине изгиба. Коэффициент согласования численно равен отношению эффективного диаметра гауссова луча градиентной линзы к длине изгиба:

$$\gamma = \frac{2w_{\text{эф}}}{\theta_s R},$$

где угол изгиба θ_s задан в радианах.

В табл. 7 приведены результаты расчета коэффициента согласования по длине изгиба γ в зависимости от угла изгиба θ_s для значений эффективного радиуса гауссова луча, взятых из табл. 4. Из табл. 7 видно, что коэффициент согласования по длине изгиба достаточно мал по сравнению с эффективностью ввода η (меньше примерно в 4–5 раз).

Таблица 7

Результаты расчета коэффициента согласования по длине изгиба (γ)

$\theta_s, ^\circ$	$w_{эф}, \text{мкм}$	$\gamma, \text{отн. ед.}$
13,0	17,6	0,077
13,5	20,5	0,087
14,0	23,5	0,096
14,5	26,5	0,105
15,0	29,6	0,113

Расчет коэффициента пропускной способности

Коэффициент пропускной способности оптической цепи при переходе из сердцевины ОВ на выходной оптический соединитель приемного ОВ определяется как коэффициентами пропускной способности каждой оптической среды, так и коэффициентами пропускной способности границ раздела сред с разными показателями преломления:

$$\tau = \tau_{п1} \cdot \tau_{п2} \cdot \tau_{п3} \cdot \tau_{од} \cdot \tau_{п4} \cdot \tau_{гл} \cdot \tau_{ос},$$

где τ с индексами служит для обозначения коэффициентов пропускной способности:

- $\tau_{п1}$ — границы раздела *оболочка — первое защитное покрытие* (О—13П);
- $\tau_{п2}$ — границы раздела *первое защитное покрытие — второе защитное покрытие* (13П—23П);
- $\tau_{п3}$ — границы раздела *второе защитное покрытие — оптическая деталь* (23П—ОД);
- $\tau_{од}$ — оптической детали;
- $\tau_{п4}$ — границы раздела *оптическая деталь — воздух* (ОД—В);
- $\tau_{гл}$ — градиентной линзы;
- $\tau_{ос}$ — выходного оптического соединителя ОВ.

Коэффициент пропускной способности границы раздела двух сред можно вычислить по известной формуле Френеля [8]:

$$\tau = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin 2\theta_{пд} \sin 2\theta_{пр}}{\sin(\theta_{пд} + \theta_{пр})^2 \cos(\theta_{пд} - \theta_{пр})^2} + \frac{\sin 2\theta_{пд} \sin 2\theta_{пр}}{\sin(\theta_{пд} + \theta_{пр})^2} \right], \quad (12)$$

где $\theta_{пд}$ и $\theta_{пр}$ — углы падения и преломления луча на границе двух сред.

Угол преломления можно определить по известному закону преломления [8]:

$$\theta_{пр} = \arcsin \left(\frac{n_1 \sin \theta_{пд}}{n_2} \right), \quad (13)$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления двух сред на границе раздела.

Структурная схема расположения оптических сред с их показателями преломления для рабочей длины волны $\lambda = 1550 \text{ нм}$ приведены на рис. 4.

В табл. 8 приведены углы падения и преломления, показатели преломления и коэффициенты пропускной способности на границах раздела двух сред, рассчитанные по формулам (12) и (13). Расчет проведен для максимального угла изгиба $\theta_s = 15^\circ$. Для минимального угла изгиба (13°) значения коэффициентов пропускной способности мало отличаются от приведенных в табл. 8.

Пропускная способность среды и ОВ обусловлена поглощением и рассеянием излучения на неоднородностях в оптических материалах. Коэффициент пропускной способности оптической детали можно вычислить по известной формуле, предложенной в [9]:

$$\tau_{од} = A^d,$$

где A [отн. ед.] — коэффициент пропускания оптической детали; d [см] — длина хода излучения в оптической детали. Для оптических стекол коэффициент A изменяется в зависимости от категории материала и имеет значения от 0,985 до 0,996 [9]. В предлагаемой оптической схеме (см. рис. 1) d можно приравнять $Z_{пр}$ из-за небольших углов отклонения излучения от оси Z и невозможности точного определения коэф-

Таблица 8

Коэффициенты пропускной способности границ раздела сред ($\lambda = 1,55 \text{ мкм}$)

Граница раздела двух сред	$\theta_{пд}, ^\circ$	$\theta_{пр}, ^\circ$	Показатели преломления среда 1/среда 2	Коэффициент пропускания, отн. ед.
О—13П	75,0	70,5	1,4447/1,4786	0,983
13П—23П	70,5	66,0	1,4786/1,5294	0,989
23П—ОД	66,0	66,0	1,5294/1,5300	1,000
ОД—В	2,0	3,1	1,5300/1,0000	0,945

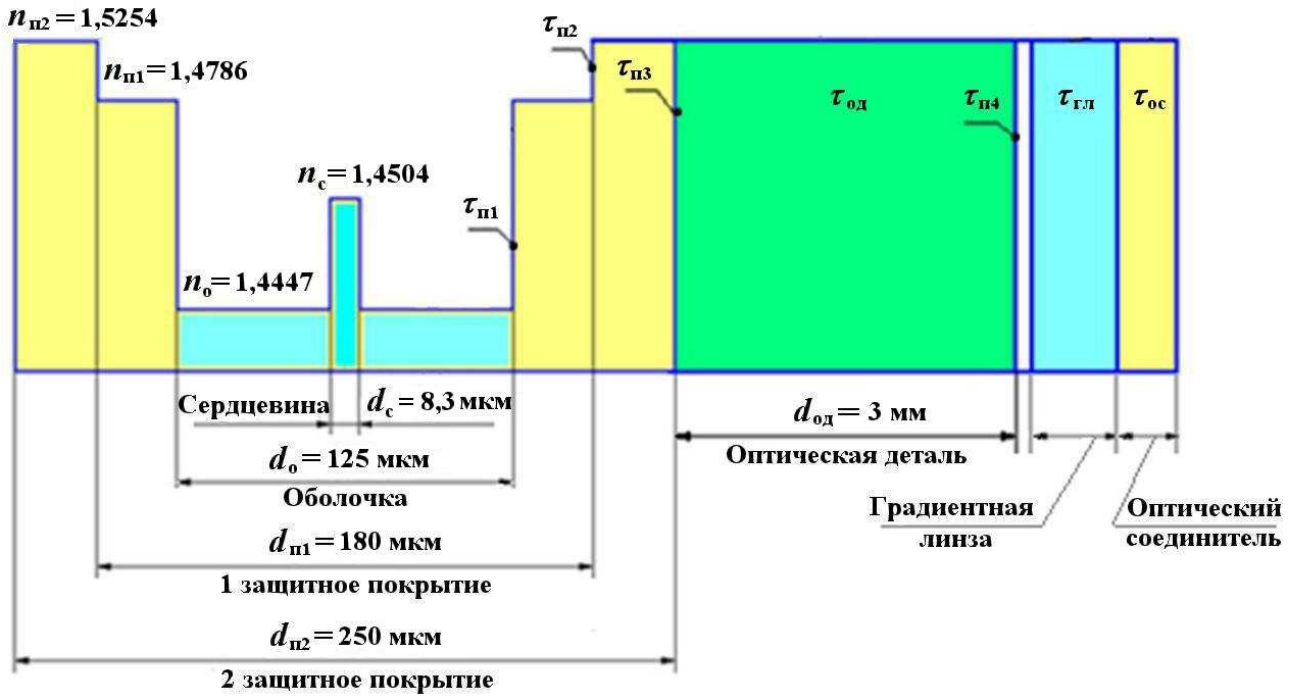


Рис. 4. Структурная схема расположения оптических сред с их показателями преломления и коэффициентами пропускной способности

фициента A . При длине оптического пути $Z_{пр} = 0,3$ см и минимальном коэффициенте пропускания $\tau_{од} = 0,985^{0,3} = 0,995$.

Коэффициент пропускной способности градиентной линзы может быть определен из паспортных данных ее потерь. Например, для устройства, приведенного на рис. 2, для максимальных потерь в 0,2 дБ [4] $\tau_{гл} = 10^{-0,02} = 0,945$.

Коэффициент пропускной способности выходного одномодового оптического соединителя FC при типовых потерях 0,2 дБ [10] имеет такое же значение: $\tau_{ос} = 0,945$.

Таким образом, коэффициент пропускной способности оптической цепи при переходе из сердцевины изогнутого ОВ на выходной оптический соединитель приемного ОВ будет равен

$$\tau = 0,983 \cdot 0,989 \cdot 1 \cdot 0,945 \cdot 0,995 \cdot 0,945 \cdot 0,945 = 0,816.$$

Так как углы падения на границах раздела меняются незначительно, полученное значение можно использовать при расчетах для всех углов изгиба в выбранном диапазоне от 13,0 до 15,2°.

Расчет коэффициентов передачи и вывода. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов

Значения коэффициента передачи, рассчитанные по формуле (3) для различных углов изгиба с использованием вышеприведенных результатов, представлены в табл. 9. В таблице также указаны значения коэффициента дополнительных потерь на двух изгибах $2A_d$, рассчитанные в работе [3], и коэффициента вывода A_v , рассчитанные с использованием $k_{п}$ и $2A_d$ по формуле [1]

$$A_v = 10 \lg \left(k_{п} (1 - 10^{-0,1 \cdot 2A_d}) \right).$$

На рис. 5 (см. также цветную вкладку) представлена построенная по данным табл. 9 расчетная кривая (3) зависимости $k_{п}$ от θ_s при условии идеальной юстировки приемной градиентной линзы и ОВ. На рис. 6 (см. также цветную вкладку) приведены расчетные зависимости коэффициента дополнительных потерь на двух изгибах $2A_d$ и коэффициента передачи $k_{п}$ от коэффициента вывода A_v , построенные по данным табл. 9 (при условии идеальной юстировки градиентной линзы и ОВ).

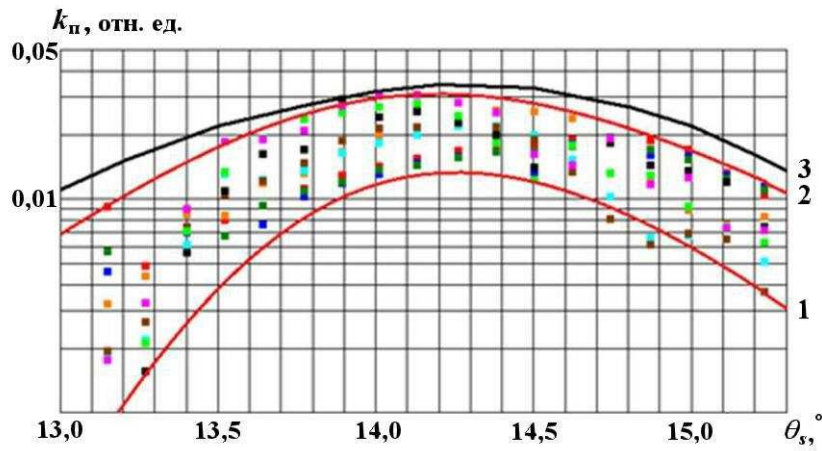


Рис. 5. Зависимости коэффициента передачи от угла изгиба ОВ ($\lambda = 1,55$ мкм): 1 — нижняя граница экспериментальных данных; 2 — верхняя граница экспериментальных данных; 3 — расчет

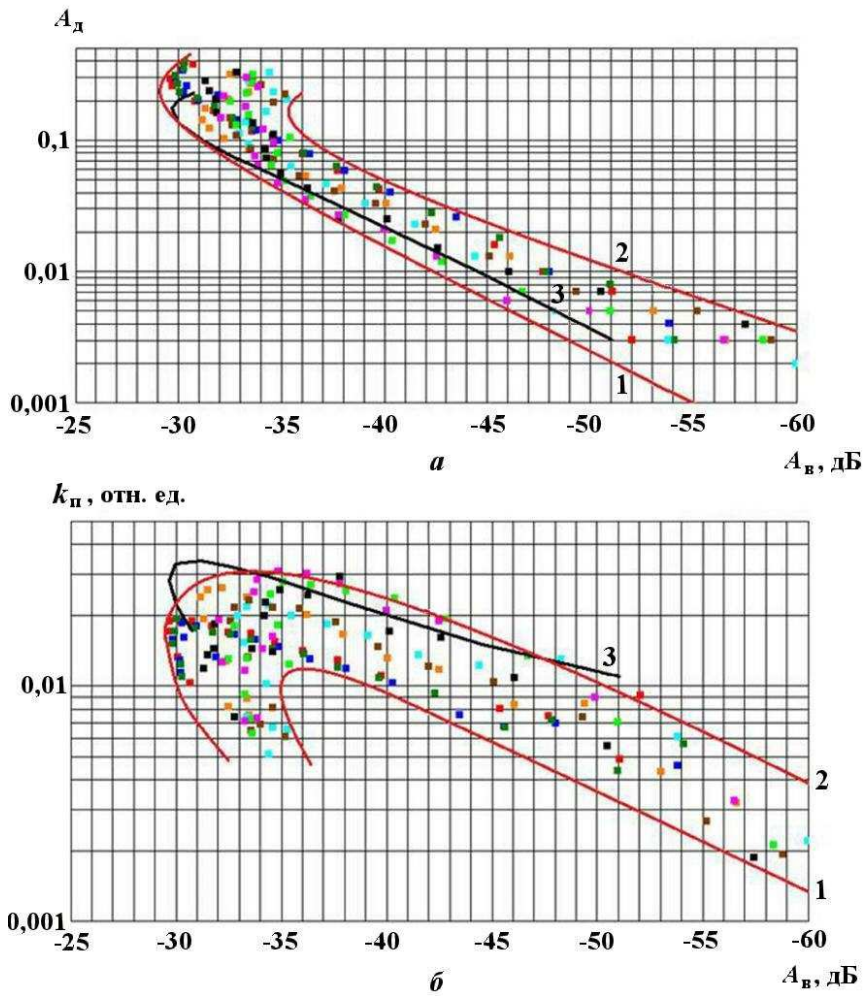


Рис. 6. Зависимости коэффициентов дополнительных потерь (a) и передачи (b) от коэффициента вывода ($\lambda = 1,55$ мкм): 1 — нижняя граница экспериментальных данных; 2 — верхняя граница экспериментальных данных; 3 — расчет

Таблица 9

Коэффициенты передачи и вывода для различных углов изгиба

$\theta_s, ^\circ$	$\theta, ^\circ$	$k_{\text{п}}, \text{отн. ед.}$	$2A_{\text{д}}, \text{дБ}$	$A_{\text{в}}, \text{дБ}$
13,0	1,0	0,011	0,003	-51,03
13,2	0,8	0,015	0,010	-44,52
13,5	0,5	0,022	0,028	-38,49
13,8	0,2	0,029	0,054	-34,51
14,0	0,0	0,032	0,074	-32,61
14,2	0,2	0,034	0,097	-31,20
14,5	0,5	0,034	0,135	-29,95
14,8	0,8	0,028	0,173	-29,66
15,0	1,0	0,022	0,200	-29,98
15,2	1,2	0,017	0,225	-30,72

По предложенной методике разработан алгоритм и написана программа расчета коэффициента передачи. Для подтверждения правильности алгоритма проведены экспериментальные исследования. Первичные данные были получены с использованием экспериментальной установки, структурная схема которой приведена на рис. 7.

В ОВ (5 на рис. 7) от оптического передатчика ОПД вводился постоянный зондирующий сигнал мощностью $W_{\text{опд}}$. Угол изгиба ОВ зада-

вался с помощью линейного перемещения с последующим пересчетом. Линейное перемещение обеспечивалось подвижкой 3. Для каждого задаваемого угла изгиба измерялись мощности на входе ($W_{\text{опд}}$) и выходе ($W_{\text{опм}}$) изогнутого ОВ с помощью оптического приемника ОПМ. Мощность выведенного сигнала на выходе приемного ОВ измерялась с помощью измерителя мощности (ИМ). Были проведены десять серий измерений. Перед каждой серией выполнялись новая установка ОВ и его прижим к оптической детали 7 с помощью втулки 9.

По измеренным значениям мощностей вычислялись параметры излучения с боковой поверхности изогнутого ОВ в зависимости от угла изгиба:

$A_{\text{в}}(\theta_s)$ [дБ] — коэффициент вывода по формуле

$$A_{\text{в}}(\theta_s) = W_{\text{им}}(\theta_s) - W_{\text{опд}}; \quad (14)$$

$2A_{\text{д}}(\theta_s)$ [дБ] — коэффициент дополнительных потерь на двух изгибах по формуле

$$2A_{\text{д}}(\theta_s) = W_{\text{опм}} - W_{\text{опм}}(\theta_s); \quad (15)$$

$k_{\text{п}}(\theta_s)$ [отн. ед.] — коэффициент передачи бокового излучения с изгиба ОВ на вход ИМ по формуле

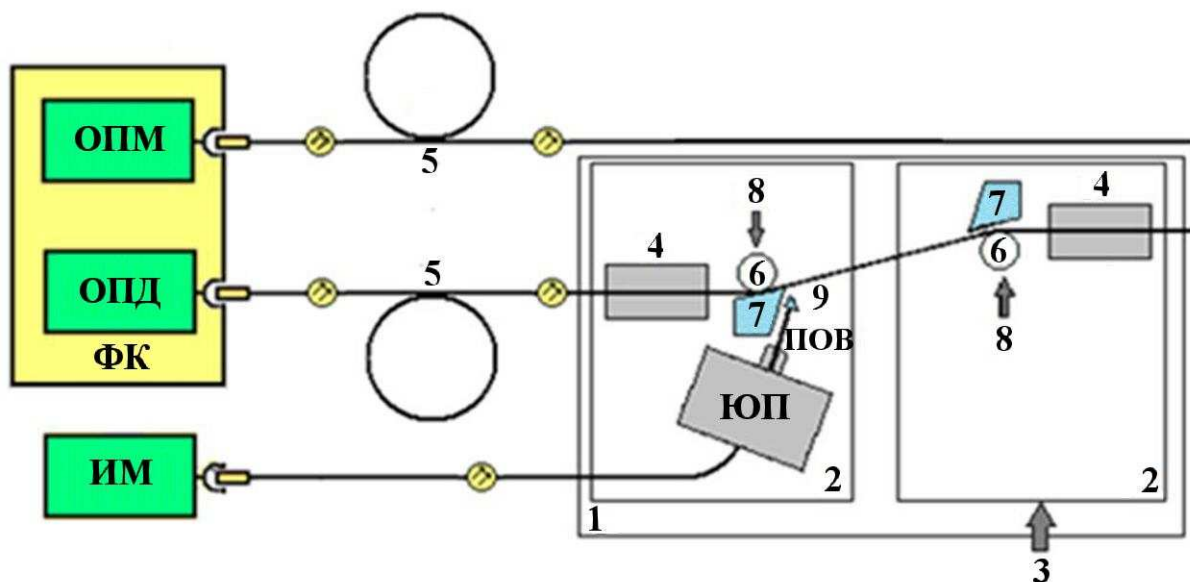


Рис. 7. Структурная схема экспериментальной установки: ФК — фрейм-контроллер AQ 2212; ОПД — оптический передатчик AQ 2200-111 ($\lambda = 1,31$ мкм) или AQ 2200-131 ($\lambda = 1,55$ мкм); ОПМ — оптический приемник AQ 2200-211; ИМ — измеритель мощности FOD1204; ЮП — юстировочная подвижка; ПОВ — приемное оптическое волокно; 1 — основание; 2 — пластина; 3 — подвижка; 4 — прижим ОВ; 5 — ОВ; 6 — изгибающая втулка; 7 — оптическая деталь; 8 — прижим втулки; 9 — призма

$$k_{\text{п}}(\theta_s) = \frac{10^{-0,1A_{\text{в}}(\theta_s)}}{1 - 10^{-0,1 \cdot 2A_{\text{д}}(\theta_s)}}. \quad (16)$$

В формулах (14)–(16) $W_{\text{опд}}$ — оптическая мощность на выходе ОПД; $W_{\text{опм}}$ — оптическая мощность на входе ОПМ для прямого ОВ; $W_{\text{опм}}(\theta_s)$ — оптическая мощность на входе ОПМ при изгибе ОВ на угол θ_s ; $W_{\text{им}}(\theta_s)$ — оптическая мощность на входе ИМ при изгибе ОВ на угол θ_s . Все мощности измеряются в дБм.

Экспериментальные результаты отмечены на рис. 5, 6 цветными квадратами. Каждой из десяти серий измерений соответствует свой цвет. Кривые 1 и 2 построены как верхняя и нижняя границы экспериментальных данных.

Из результатов, полученных в расчетах и экспериментах, можно сделать следующие выводы:

1. Расчетная зависимость $k_{\text{п}}$ от θ_s расположена выше, но близко к верхней огибающей экспериментальных данных (см. рис. 5). Это подтверждает правильность предлагаемого алгоритма для расчетов коэффициента передачи изогнутого ОВ.
2. 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 $k_{\text{п}}$ и $A_{\text{д}}$ при одних и тех же $A_{\text{в}}$ достигают от 3 до 5–7 раз.
3. Расчетные зависимости $A_{\text{д}}$ и $k_{\text{п}}$ от $A_{\text{в}}$ расположены вблизи нижней и верхней границ экспериментальных данных соответственно. Нижняя граница зависимости $A_{\text{д}} = f(A_{\text{в}})$ определяет максимальный уровень выводимой мощности при минимальных потерях (лучший результат), а верхняя граница зависимости $k_{\text{п}} = f(A_{\text{в}})$ — максимальную эффективность сбора потерянного на изгибе излучения (лучший результат).

Заключение

Предложена методика расчета коэффициента передачи излучения из сердцевины изогнутого одномодового ОВ на приемное ОВ с помощью согласованной по показателю преломления оптиче-

ской среды и градиентной линзы. По вышеизложенному алгоритму разработана программа расчета коэффициента передачи. Алгоритм и программа позволяют расчетным путем проводить оптимизацию коэффициента передачи для различных типов ОВ, параметров изгиба, среды передачи и оптической системы сбора излучения.

Результаты расчета по предлагаемым алгоритму и программе могут быть использованы для оценки предельно достижимых параметров при разработке различных устройств вывода и сбора излучения с боковой поверхности ОВ по схеме, представленной на рис. 1.

Измерения на разработанной экспериментальной установке позволили получить данные, которые хорошо согласуются с результатами расчета. Статистический разброс экспериментальных результатов, полученный в разных сериях измерений, свидетельствует о несовершенстве конструкции установки. В первую очередь это относится к механизму прижима ОВ к оптической детали, который не обеспечивает стабильного местоположения ОВ.

Список литературы

1. Шубин В. В. Информационная безопасность волоконно-оптических систем. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2015.
2. Малых Ю. В., Шубин В. В. Метод расчета эффективности передачи излучения с боковой поверхности изогнутого одномодового оптического волокна на приемное оптическое устройство // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2016. Вып. 1. С. 69–79.
3. Малых Ю. В., Шубин В. В. Методика расчета потерь излучения на начальном участке изогнутого одномодового оптического волокна // Там же. Вып. 4. С. 66–76.
4. Оптические зонды Miniature OCT Fiber Probe фирмы Agiltron. www.aligtron.com.
5. Saruwatary M., Nawata K. Semiconductor Laser to Single-Mode Fiber Coupling // Appl. Optics. 1979. Vol. 18(11). P. 1847–1856.
6. Аксенов В. А., Волошин В. В., Воробьев И. Л. и др. 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.
7. ГОСТ 13659-78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1978.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1972.
9. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.—Л.: Машиностроение, 1966.
10. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. М.: ЭКО-ТРЕНЗ, 2000.

Статья поступила в редакцию 05.05.16.

A TECHNIQUE FOR CALCULATION OF TRANSMISSION GAIN OF RADIATION FROM THE CORE OF A BENDED ONE-MODE FIBER-OPTIC CHANNEL TO A RECEIVING FIBER OPTICS / Yu. V. Malykh, V. V. Shubin (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod region).

The paper presents a technique for the calculation of the transmission gain of radiation from the core of a bended one-mode optical fiber to a receiving optical fiber. The technique allows accounting the Gaussian beams interaction efficiency (overlap integrals), radiation transmission by all fiber-optic components, and radiation losses depending on the bend length. The developed technique was used to calculate the transmission gain depending on the bend angle and the extraction coefficient for the SMF-28 type optical fiber. The calculated results are compared with experimental data.

Keywords: bended one-mode optical fiber, Gaussian beams, radius of mode spot, gain of radiation transmission through a lateral surface.
