

УДК 628.953

МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИЗЛУЧЕНИЯ С БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОГНУТОГО ОДНОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ПРИЕМНОЕ ОПТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО

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

Представлен метод расчета параметров передачи излучения с боковой поверхности изогнутого одномодового оптического волокна на приемное оптическое устройство. Рассмотрена основная характеристика вывода излучения из оптического волокна и основной параметр его эффективности — коэффициент передачи бокового излучения $k_{\text{п}}$. Приведены разработанная оптическая схема вывода излучения на изгибе и порядок расчета оптимального положения приемного одномодового оптического устройства. Представлена процедура расчета эффективности согласования параметров приемного оптического устройства и изгиба одномодового волокна, а также потерь на границах раздела различных сред и на поглощение при передаче. Проведено сравнение результатов расчета эффективности передачи по предлагаемому методу с экспериментальными данными.

Ключевые слова: изгиб одномодового оптического волокна, переходные потери, метод расчета передачи излучения, метод расчета эффективности ввода излучения в оптико-волоконные устройства.

Введение

При проведении мониторинга оптических волокон 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 нужно отвести достаточную для регистрации мощность сигнала при минимальных 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]. Поэтому выведенное через боковую поверхность излучение надо передать на оптический усилитель, который представляет собой стандартный одномодовый оптический соединитель.

В научно-технической литературе содержится описание большого количества способов и устройств вывода излучения с помощью изгибов волокна на активные площадки фотодетекторов большого размера. Известны способы с непосредственным изгибом на активной площадке [2, 3], с использованием для сбора и вывода излучения дополнительного световода [4, 5], среза защитного покрытия [6, 7]. Все они не подходят для современных ВОСП из-за больших размеров активных площадок фотодетекторов, что обуславливает большую емкость фотодетектора и соответственно, низкую полосу частот принимаемых сигналов. Известны промышленно выпускаемые устройства ввода/вывода излучения в одномодовое оптическое волокно типа *ответитель-прищепка* и определители активных волокон [8—11], но эти устройства не имеют регулировок и при подключении вносят в линию достаточно большие дополнительные потери (более 2 дБ), что не подходит для мультиплексоров и систем мониторинга. Известны схемы ввода/вывода излучения в одномодовые оптические

волокна (например [12]), но достаточно подробного описания их действия и методов расчета в литературных источниках авторами не обнаружено. В первую очередь необходимо определить основную характеристику устройств вывода излучения из оптического волокна: зависимость внесенных потерь от коэффициента вывода излучения.

Основная характеристика для вывода излучения из волокна

Вывод излучения через боковую поверхность волокна описывается зависимостью дополнительных потерь A_d от коэффициента вывода A_v по формуле [13]

$$A_d = -10 \lg(1 - 10^{-0,1A_v} k_{\text{п}}^{-1}) \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где $A_v = 10 \lg(p_v/p_o) \text{ [дБ]}$ — коэффициент вывода, показывающий, какая часть излучения из волокна попала на выходной полюс приемного оптического устройства (ОУ); $k_{\text{п}} = p_v/p_{\text{п}}$ [отн. ед.] — коэффициент передачи излучения, потерянного в результате вывода на выходной полюс приемного ОУ; $p_o \text{ [Вт]}$ — мощность оптического сигнала в сердцевине оптического волокна; $p_{\text{п}} \text{ [Вт]}$ — мощность оптического сигнала, потерянная в волокне при выводе излучения; $p_v \text{ [Вт]}$ — мощность оптического сигнала, попавшего на выходной полюс приемного ОУ с боковой поверхности волокна.

На рис. 1 приведены кривые, рассчитанные по формуле (1) для различных коэффициентов передачи бокового излучения на входную площадку приемника $k_{\text{п}}$. Характеристики реальных устройств могут располагаться только в более светлой зоне рисунка. В более темной зоне они располагаться не могут, так как в этом случае будет нарушаться закон сохранения энергии: мощность излучения, попавшего на входную площадку приемника, будет больше потерянной в волокне (естественное боковое излучение на локальном участке пренебрежимо мало) [13]. Предельно достижимым граничным условием является кривая 6 при коэффициенте передачи, равном единице. В этом случае вся потерянная в волокне мощность сигнала попадает на выходной полюс приемного ОУ.

Для каждого коэффициента передачи $k_{\text{п}}$ существует предельное значение коэффициента вывода (вертикальные прямые на рис. 1), которое не может быть получено для данного $k_{\text{п}}$ даже

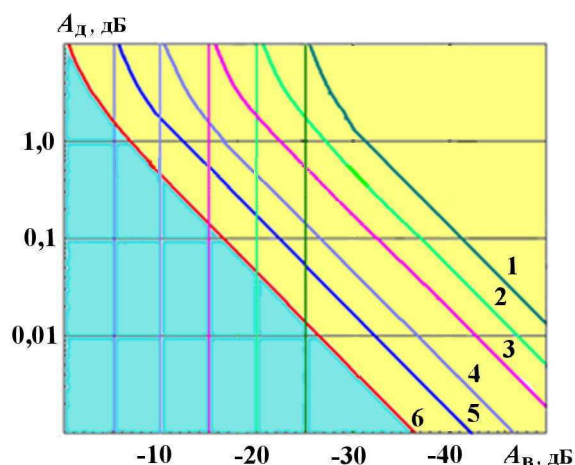


Рис. 1. Зависимости коэффициента дополнительных потерь от коэффициента вывода для различных коэффициентов передачи: 1 — $k_{\text{п}} = 0,003$; 2 — $k_{\text{п}} = 0,01$; 3 — $k_{\text{п}} = 0,03$; 4 — $k_{\text{п}} = 0,1$; 5 — $k_{\text{п}} = 0,3$; 6 — $k_{\text{п}} = 1$

при бесконечно большом коэффициенте дополнительных потерь A_d . Это значение равно

$$A_v = -10 \lg k_{\text{п}} \text{ [дБ]}.$$

Таким образом, коэффициент передачи $k_{\text{п}}$ является ключевым параметром, определяющим характеристику передачи излучения с боковой поверхности волокна на приемное ОУ. Для определения $k_{\text{п}}$ необходимо рассмотреть более подробно схему передачи оптического излучения из сердцевины изогнутого волокна на выходной полюс приемного ОУ.

Вывод и передача излучения на приемное ОУ

Эффективный вывод излучения из оптического волокна, как известно, может быть осуществлен при использовании переходных потерь [13]. Для этого волокно должно быть изогнуто по малому радиусу на небольшой угол. Например, на рис. 2 (см. также цветную вкладку) представлены фазы распределения в поперечных сечениях интенсивности излучения, выводимого из сердцевины стандартного одномодового волокна SMF-28 на изгибе с радиусом $R = 1,0 \text{ мм}$, для различных углов изгиба Φ и длины изгиба z из статьи [14]. Основные параметры волокна SMF-28 представлены в табл. 1 [15]. Длина изгиба z связана с углом изгиба Φ простой зависимостью

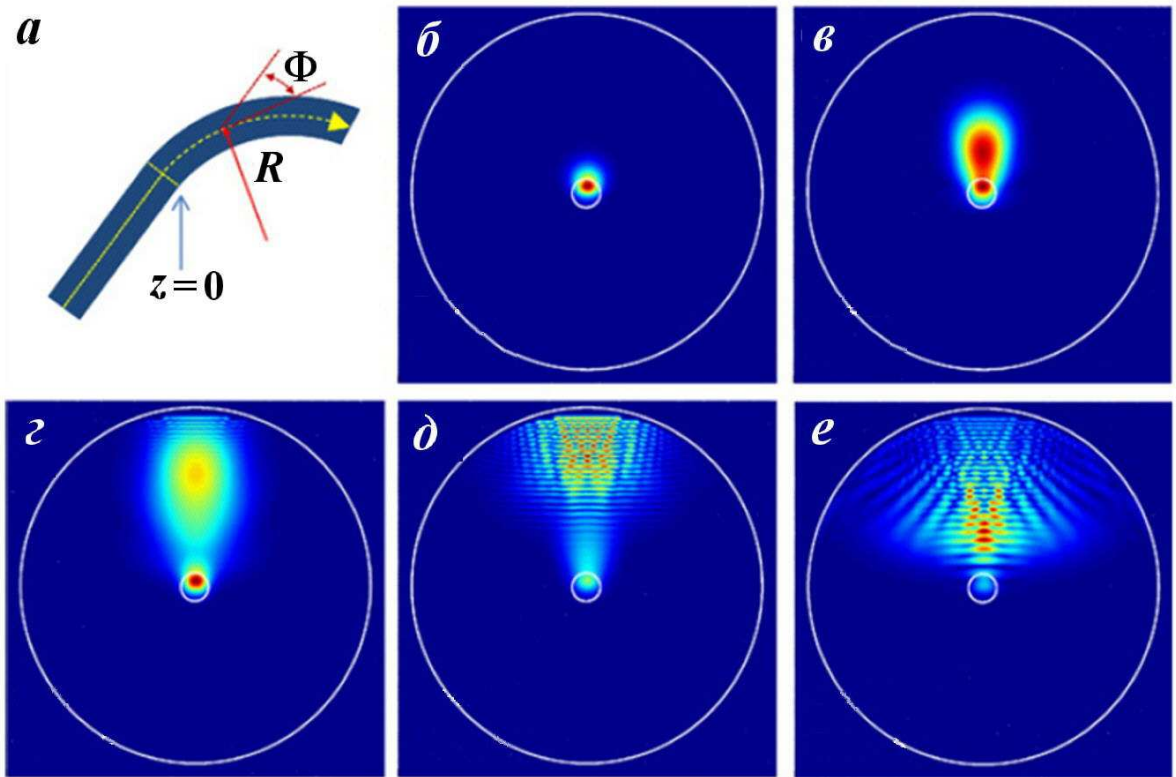


Рис. 2. Изгиб волокна (а) и распределение интенсивности выводимого на нем излучения (б–е): б — $\Phi = 5,7^\circ$; $z = 100$ мкм; в — $\Phi = 11,5^\circ$; $z = 200$ мкм; г — $\Phi = 17,2^\circ$; $z = 300$ мкм; д — $\Phi = 22,9^\circ$; $z = 400$ мкм; е — $\Phi = 28,6^\circ$; $z = 500$ мкм

$$z = \frac{2\pi R\Phi}{360} [\text{мкм}],$$

где R [мкм] и Φ [°] — радиус и угол изгиба соответственно.

Из рис. 2, б видно, что при изгибе вначале происходит смещение поля основной моды HE₁₁ относительно оси волокна. Это вызывает формирование оболочечной моды (см. рис. 2, в), которая распространяется в направлении границы раздела *отражающая оболочка — защитное покрытие*. При достижении этой границы раздела (см. рис. 2, г) излучение частично проходит

в защитное покрытие, частично отражается от границы раздела и распространяется в обратном направлении (см. рис. 2, д, е).

Как известно [16], излучение в поперечном сечении волокна имеет распределение интенсивности Гаусса и при распространении обладает угловой расходимостью 2θ , обусловленной дифракцией. Половинный угол расходимости гауссова пучка может быть определен по известной формуле [16]

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} [\text{рад}],$$

Таблица 1

Параметры одномодового оптического волокна SMF-28

Наименование слоя	Радиус, мкм	Показатель преломления на длине волны 1,55 мкм
Сердцевина	4,15	1,4504
Отражающая оболочка	62,5	1,4447
Первое защитное покрытие	95	1,4786
Второе защитное покрытие	125	1,5294

где ω_0 [мкм] — радиус гауссова луча на уровне $1/e^2 = 0,135$. Например, для длины волны $\lambda = 1,31$ мкм и $\omega_0 = 5$ мкм $\theta = 0,08$ рад ($4,6^\circ$), для $\lambda = 1,55$ мкм и $\omega_0 = 5$ мкм $\theta = 0,1$ рад ($5,7^\circ$). Как видно из рис. 2, излучение достигает границы отражающей оболочки при некотором угле изгиба, который может быть назван начальным углом выхода излучения θ_{\min} и определен по формуле [17]

$$\theta_{\min} = \arccos\left(\frac{R + r_c}{R + r_o}\right), \quad (2)$$

где R — радиус изгиба волокна; r_c — радиус сердцевины волокна; r_o — радиус отражающей оболочки волокна.

Таким образом, волокно целесообразно первоначально изогнуть на угол θ_{\min} , рассчитанный по формуле (2), а потом за счет увеличения изгиба на угол θ_s регулировать мощность выводимого излучения.

На рис. 3 (см. также цветную вкладку) представлена схема передачи излучения через боковую поверхность изогнутого волокна на приемное ОУ, построенная на основе вышеизложенного положения. Для того чтобы излучение 4 выходило за пределы защитного покрытия волокна, между приемным ОУ 2 и волокном 1 помещается иммерсионная среда 3 с показателем преломления, близким к показателю преломления защитного покрытия. В противном случае из-

лучение будет распространяться по защитному покрытию без выхода за его пределы.

Коэффициент передачи излучения от изгиба волокна к приемному ОУ для схемы, представленной на рис. 3, будет равен

$$k_{\text{п}} = \tau_1 \tau_2 \tau_{\text{ср}} \tau_{\text{оу}} \eta, \quad (3)$$

где τ_1, τ_2 — коэффициенты пропускной способности границ раздела сред *отражающая оболочка — защитное покрытие* и *иммерсионная среда — приемное ОУ* соответственно; $\tau_{\text{ср}}$ — коэффициент пропускной способности среды и волокна на всем пути прохождения излучения в оптической среде; $\tau_{\text{оу}}$ — коэффициент пропускной способности приемного ОУ; η — эффективность ввода излучения в приемное ОУ.

В качестве приемного одномодового ОУ оптимально подходит отрезок одномодового оптического волокна с градиентной линзой (GRIN) на переднем торце. На рис. 4 представлена схема такого устройства и его основные параметры — передний отрезок $S = WD$ и минимальный радиус гауссова луча ω_0 , а также распределение интенсивности излучения во входном пучке. Прямые потери без учета потерь в выходном оптическом соединителе в устройстве составляют не более 0,2 дБ, что соответствует коэффициенту пропускной способности $\tau_{\text{оу}} = 0,945$.

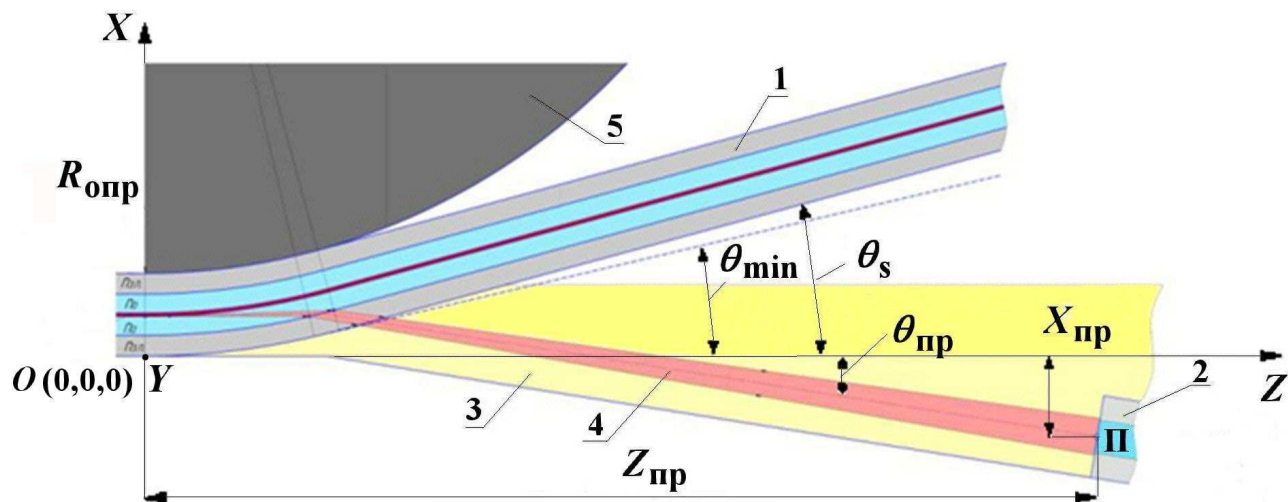


Рис. 3. Схема передачи излучения на приемное ОУ: 1 — оптическое волокно; 2 — приемное ОУ; 3 — иммерсионная среда; 4 — область вышедшего излучения; 5 — изгибная оправа радиусом $R_{\text{опр}}$; θ_s — угол изгиба волокна

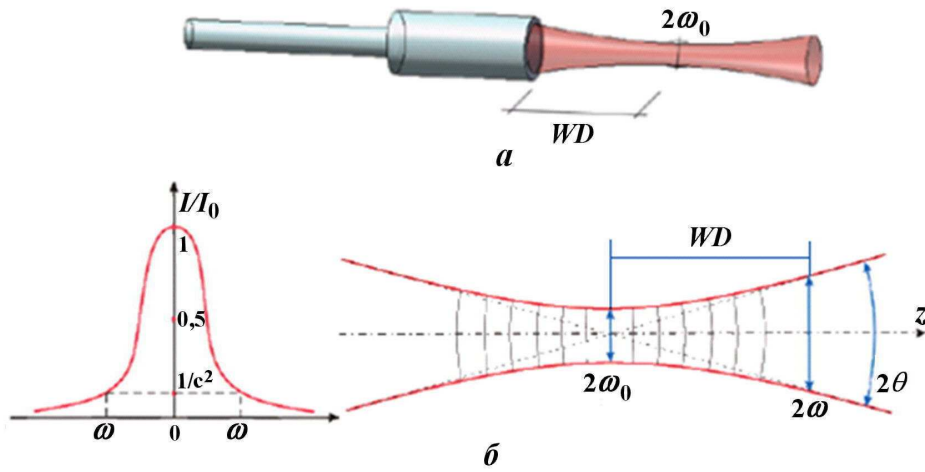


Рис. 4. Приемное ОУ (а) и распределение интенсивности излучения в нем (б)

Порядок расчета координат установки приемного ОУ

В соответствии с рис. 3 для установки приемного ОУ необходимо определить его координаты (точка П с координатами $X_{пр}$, $Z_{пр}$, $\theta_{пр}$, $Y_{пр} = 0$) относительно точки начала изгиба волокна $O(0,0,0)$. На рис. 5 представлены схема и основные параметры, которые необходимы для расчета*.

Для обеспечения максимальной эффективности сбора излучения расположение оптической оси приемного ОУ должно совпадать с направлением вектора Умова—Пойтинга выходящего излучения. Поскольку при изменении угла изгиба от θ_{min} до θ_s меняется направление вектора Умова—Пойтинга, то целесообразно номинальную настройку осуществить на среднее положение, т. е. на угол $(\theta_{min} + \theta_s)/2$, или осуществлять юстировку для нескольких положений.

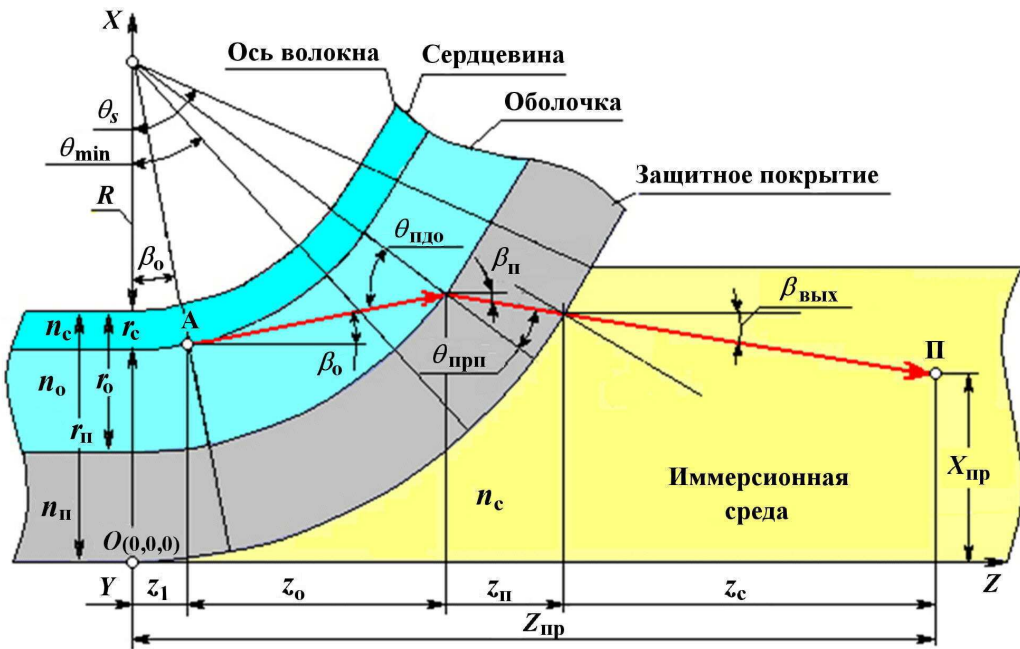


Рис. 5. Параметры схемы передачи излучения на приемное ОУ

*Масштаб на рисунке не соблюден и изображена только нижняя от оси часть оптического волокна.

Излучение из точки A , расположенной на границе *сердцевина — оболочка*, выходит под углом $\beta_o = (\theta_s - \theta_{\min})/2$ к горизонтальной оси Z ; $\theta_{\text{пдо}}$ — угол падения луча на границу раздела *оболочка — защитное покрытие*; $\theta_{\text{прп}}$ — угол преломления луча в защитном покрытии; $\beta_{\text{п}}$ — угол распространения луча в защитном покрытии относительно горизонтальной оси Z ; $\beta_{\text{вых}}$ — угол выхода луча из защитного покрытия в иммерсионную среду относительно горизонтальной оси Z .

Для наилучшей эффективности сбора излучения требуется совмещение плоскости выхода излучения из сердцевина в точке A с плоскостью расположения перетяжки гауссова луча ($2\omega_0$) приемного ОУ (см. рис. 4). Тогда координата $Z_{\text{пр}}$ относительно точки отсчета $O(0, 0, 0)$ рассчитывается как сумма путей, проходимых лучом в оболочке, защитном покрытии и иммерсионной среде, с учетом длины z_1 . Пусть $z_o, z_{\text{п}}, z_c$ — длины путей луча в оболочке, защитном покрытии и среде в проекции на ось Z . Для расчета этих длин воспользуемся формулами, которые следуют из геометрии рис. 5:

$$\begin{aligned} \beta_o &= \frac{\theta_s - \theta_{\min}}{2}; \\ z_1 &= (R + r_c) \sin(\beta_o); \\ \theta_{\text{пдо}} &= \arcsin\left(\frac{R + r_c}{R + r_o}\right); \\ z_o &= (R + r_o) \cos(\theta_{\text{пдо}}) \cos(\beta_o); \\ \theta_{\text{прп}} &= \arcsin\left(\frac{n_o R + r_c}{n_{\text{п}} R + r_o}\right); \\ \beta_{\text{п}} &= \theta_{\text{прп}} + \beta_o - \theta_{\text{пдо}}; \\ z_{\text{п}} &= \frac{r_{\text{п}} - r_o}{\cos \theta_{\text{прп}}} \cos(\beta_{\text{п}}). \end{aligned}$$

Величина z_c может быть рассчитана следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{z_o}{n_o} + \frac{z_{\text{п}}}{n_{\text{п}}} + \frac{z_c}{n_c} &= \frac{S}{n_{\text{в}}} \Rightarrow \\ \Rightarrow z_c &= \left(\frac{S}{n_{\text{в}}} - \frac{z_o}{n_o} - \frac{z_{\text{п}}}{n_{\text{п}}}\right) n_c, \end{aligned}$$

где $n_o, n_{\text{п}}, n_c, n_{\text{в}}$ — показатели преломления излучения в оболочке, защитном покрытии, иммерсионной среде и воздухе соответственно; S — передний отрезок приемного ОУ.

Таким образом, расстояние от начала изгиба до приемного устройства по оси Z равно сумме отрезков:

$$Z_{\text{пр}} = z_1 + z_o + z_{\text{п}} + z_c.$$

Оптическая ось приемного устройства должна совпадать с направлением выхода излучения из защитного покрытия под углом $\beta_{\text{вых}}$. Угол выхода излучения с боковой поверхности волокна относительно горизонтальной оси Z на границе *защитное покрытие — иммерсионная среда* можно рассчитать по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \beta_{\text{вых}} &= \arcsin\left(\frac{n_o R + r_c}{n_c R + r_o}\right) - \\ &- \arcsin\left(\frac{R + r_c}{R + r_o}\right) + (\theta_s - \theta_{\min}). \end{aligned}$$

Средний угол выхода луча $\beta_{\text{вых.ср}}$ при изменении угла изгиба волокна от θ_{\min} до θ_s определяется по формуле

$$\beta_{\text{вых.ср}} = \beta_{\text{вых}(\theta_s)} - \frac{(\theta_s - \theta_{\min})}{2},$$

где $\beta_{\text{вых}(\theta_s)}$ — угол выхода излучения при угле изгиба θ_s .

Таким образом, координаты расположения приемного ОУ могут быть определены с использованием вышеизложенных формул.

Пропускная способность на границах раздела и потери на поглощение в среде

Рассмотрим составляющие для расчета коэффициента передачи излучения по формуле (3). При прохождении границы раздела двух сред излучение делится на две составляющие: отраженную обратно и прошедшую во вторую среду. По формулам Френеля коэффициент пропускной способности на границе раздела τ равен [18]

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{2} (\tau_{\perp} + \tau_{\parallel}) = \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\sin 2\theta_{\text{пд}} \sin 2\theta_{\text{пр}}}{\sin(\theta_{\text{пд}} + \theta_{\text{пр}})^2 \cos(\theta_{\text{пд}} - \theta_{\text{пр}})^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sin 2\theta_{\text{пд}} \sin 2\theta_{\text{пр}}}{\sin(\theta_{\text{пд}} + \theta_{\text{пр}})^2} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где τ_{\perp} и τ_{\parallel} — коэффициенты пропускной способности излучения в перпендикулярной и параллельной плоскостях относительно плоскости падения; $\theta_{\text{пд}}$ и $\theta_{\text{пр}}$ — углы падения и преломления луча на границе двух сред.

На рис. 6 представлен график зависимости коэффициента пропускной способности τ от угла падения $\theta_{\text{пд}}$ на границе раздела двух сред, рассчитанной по формуле (4).

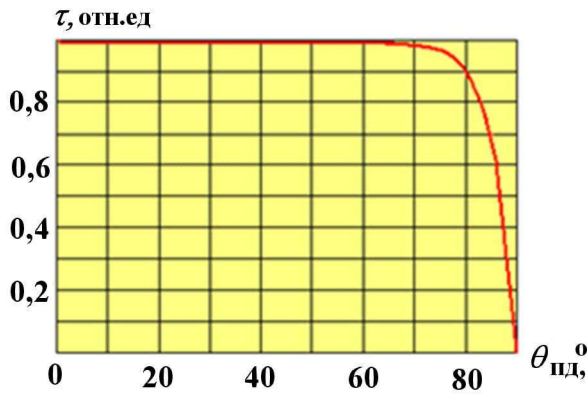


Рис. 6. Зависимость пропускной способности границы раздела двух сред от угла падения лучей

Как видно из рис. 6, для углов падения от 0 до 60° потерями на границе раздела при расчетах можно пренебречь. При увеличении угла падения более 60° пропускная способность границы раздела уменьшается, что необходимо учитывать в расчетах.

Пропускная способность иммерсионной среды и оптического волокна на пути прохождения излучения обусловлена поглощением и рассеянием излучения на неоднородностях в оптических материалах. Коэффициент пропускной способности оптической среды можно вычислить по известной формуле [19]

$$\tau_{ср} = a^d, \quad (5)$$

где a [отн. ед.] — коэффициент пропускания оптического материала; d [см] — суммарная длина пути прохождения излучения в оптической среде.

Для оптических стекол коэффициент a изменяется в зависимости от категории материала и имеет значения от 0,985 до 0,996 [19]. В предлагаемой оптической схеме (см. рис. 5) $d \approx Z_{пр}$ в связи с малыми углами отклонения излучения от оси Z . При $Z_{пр}$ в несколько миллиметров коэффициент пропускания будет близок единице (более 0,99) в случае однородного оптического материала.

Эффективность ввода в приемное ОУ

Определяющий для коэффициента передачи параметр — эффективность ввода излучения в приемное ОУ. Анализ согласования источника излучения с приемным ОУ следует проводить,

предполагая, что как выход, так и вход излучения может быть описан при помощи симметричных лучей Гаусса. Тогда с использованием интеграла наложения эффективность ввода определяется наложением данных гауссовых лучей в одной плоскости и равна [20]

$$\eta = k \exp \left(-k \left[\frac{x^2}{2} \left(\frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_0^2} \right) + \frac{\pi^2 \theta^2 (\omega_1(z)^2 + \omega_0^2)}{2\lambda} - \frac{x\theta z}{\omega_1^2} \right] \right), \quad (6)$$

$$k = \frac{4\omega_1^2 \omega_0^2}{(\omega_1^2 + \omega_0^2)^2 + \left(\frac{\lambda z}{\pi} \right)^2}, \quad (7)$$

где ω_0 — радиус гауссова луча приемного ОУ; ω_1 — радиус гауссова луча на выходе из сердцевинного волокна; x, z, θ — соответственно радиальное, осевое и угловое смещение гауссовых лучей относительно друг друга.

При совмещении сечений гауссовых лучей ($z = 0$), что соответствует оптимальному согласованию, формулы упрощаются:

$$\eta = k \exp \left(\frac{-2x^2}{\omega_1^2 + \omega_0^2} - \frac{2\pi^2 \theta^2 \omega_1^2 \omega_0^2}{\lambda^2 (\omega_1^2 + \omega_0^2)} \right), \quad (8)$$

$$k = \frac{4}{\left(\frac{\omega_0}{\omega_1} + \frac{\omega_1}{\omega_0} \right)^2}. \quad (9)$$

Радиус пятна гауссова луча на выходе из изгиба оптического волокна, который определяется для уровня мощности $1/e^2$ от максимального значения, равен

$$\omega_1 = \frac{d_c}{2} \left(0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6} \right),$$

где d_c — диаметр сердцевинного волокна. Волноводный параметр волокна вычисляется по известной формуле

$$V = \frac{\pi d_c}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_o^2}.$$

Радиус пятна гауссова луча на расстоянии осевого смещения z от источника составит

$$\omega_1(z) = \omega_1^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right].$$

При отсутствии всех смещений (идеальная юстировка), т. е. при $z = 0, x = 0, \theta = 0$, получаем

максимальную эффективность ввода излучения $\eta = k$. Из формулы (8) следует, что максимальная эффективность ввода будет достигаться при условии равенства радиусов $\omega_1 = \omega_0$ и составит $\eta \approx 1,0$. На практике получить такое значение невозможно из-за высоких требований к юстировке. При неточном совмещении плоскостей гауссовых лучей эффективность ввода меньше максимального значения.

На рис. 7 представлены графики зависимостей эффективности ввода при различных смещениях гауссовых лучей относительно друг друга по радиальным координатам x и y , осевой координате z и углу θ , рассчитанных по формулам (6), (7) для случая $\omega_1 = 5$ мкм, $\omega_0 = 20$ мкм. Из рисунка следует, что уменьшение коэффициента вывода на 1% при каждом из смещений произойдет при радиальном смещении всего на $\Delta x = 1,5$ мкм, при осевом смещении на $\Delta z = 90$ мкм, при угловом смещении на $\Delta\theta = 0,21^\circ$. Это накладывает очень жесткие требования на точность юстировки положения приемного ОУ.

Оценим предельную эффективность ввода из условия, что по каждой из координат удалось добиться позиционирования с точностью 10%. Тогда $\eta = 0,9^4 = 0,66$. Таким образом, коэффициент передачи $k_{\text{п}}$, определяемый по формуле (3) при значениях $\tau_1 = \tau_2 = 0,95$; $\tau_{\text{ср}} = 0,99$; $\tau_{\text{ОУ}} = 0,945$; $\eta = 0,66$, рассчитанных по формулам (4)–(6), может достигать максимального значения 0,56.

Экспериментальная апробация методики расчета эффективности

Для проверки методики расчета эффективности ввода излучения в приемное ОУ было проведено сравнение расчетных значений, полученных по формулам (3) и (6), с экспериментальными результатами, описанными в работе [21].

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 8 (см. также цветную вкладку). Одномодовое волокно 1 размещалось в пазу на приемном волокне 2. Сверху в паз вертикально (по координате x) опускался прижим 4 с заданным радиусом 0,5 мм. На рис. 8 показаны два положения прижима. Таким образом, между волокнами 1 и 2 координаты x , y , θ оставались неизменными. В зависимости от перемещения прижима изменялась только координата z . В этом случае коэффициент передачи составляет

$$k_{\text{п}} = \tau_1 \tau_2 \tau_{\text{ср}} \tau_{\text{ОУ}} \eta \approx \eta. \quad (10)$$

Расчет η проводился по более простой формуле, полученной из формул (6) и (7) для $x = y = \theta = 0$,

$$\eta = \frac{4\omega_1^2 \omega_0^2}{(\omega_1^2 + \omega_0^2)^2 + \left(\frac{\lambda z}{\pi}\right)^2} \quad (11)$$

для двух крайних значений z : $z = 1$ мм и $z = 2$ мм при $\omega_1 = 5$ мкм, $\omega_0 = 5$ мкм (приемное одномодовое волокно) и $\omega_0 = 25$ мкм (приемное

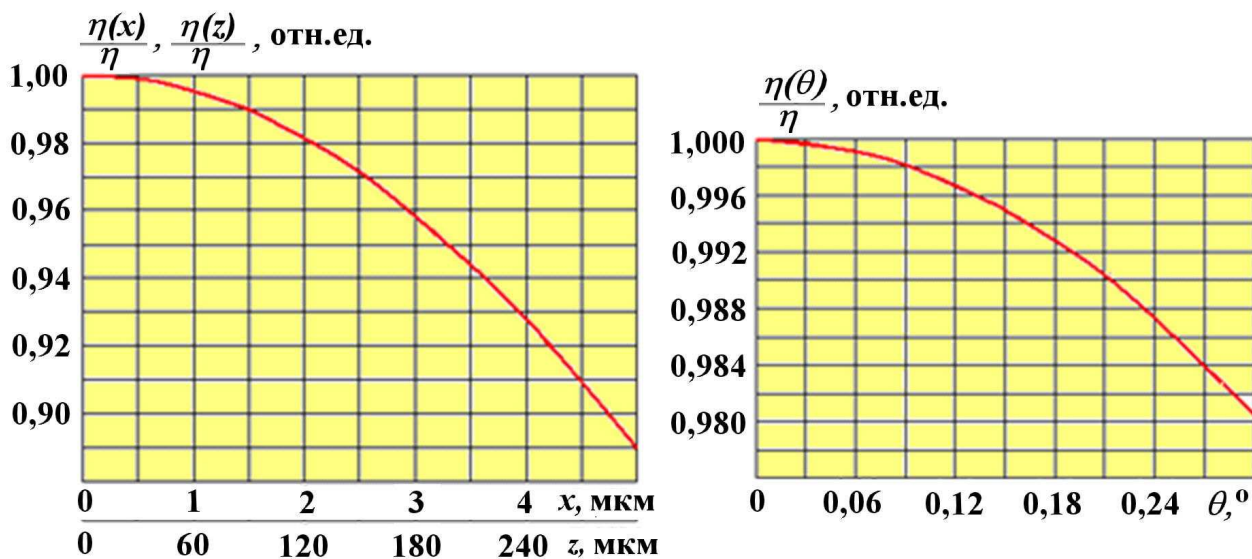


Рис. 7. Зависимости изменения эффективности ввода излучения при радиальном (x или y), осевом (z) и угловом (θ) смещении оптических осей источника и приемника

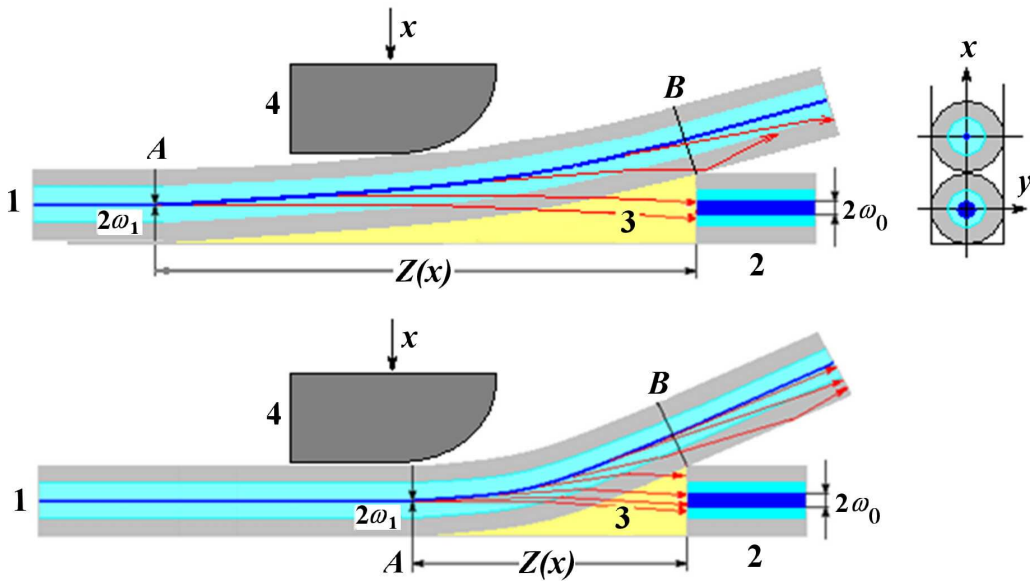


Рис. 8. Схема изгиба волокна и расположения приемного устройства: 1 — оптическое волокно; 2 — приемное оптическое волокно; 3 — иммерсионная среда; 4 — прижим; A — плоскость начала изгиба; B — плоскость окончания изгиба; x — координата перемещения прижима

многомодовое волокно) для длин волн оптического излучения 1,31 и 1,55 мкм. $z = 1$ мм — оптимальное значение, так как в этом случае максимальный угол выхода излучения соответствует апертуре волокна; $z = 2$ мм соответствует началу изгиба.

Максимальные значения η , рассчитанные по формуле (11), приведены в табл. 2; здесь же приведены экспериментально полученные значения. При вводе излучения в одномодовое волокно совпадение экспериментальных и расчетных результатов достаточно хорошее (расхождение

10—20 %). При вводе в многомодовое волокно расхождение в расчетных и экспериментальных данных превышает 50 %. Это, видимо, обусловлено тем, что в многомодовое волокно вводится большое количество мод и эффективный радиус луча определен неверно. В формуле (9) используется $\omega_1 = 25$ мкм, равное радиусу сердцевинки волокна, так как данных для радиуса гауссова луча для многомодового волокна не обнаружено.

Рис. 9 (см. также цветную вкладку) содержит экспериментальные графики, полученные на

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные значения эффективности ввода η в приемные оптические волокна для устройств со схемой на рис. 8

Тип приемного ОУ	Длина волны λ , мкм	Расстояние z , мм	Эффективность ввода η , отн.ед.	
			Расчет	Эксперимент
Одномодовое, $\omega_0 = 5$ мкм	1,55	1	0,010	0,009
		2	0,0026	0,0028
	1,31	1	0,014	0,013
		2	0,0036	0,0030
Многомодовое, $\omega_0 = 25$ мкм	1,55	1	0,094	0,040
		2	0,045	0,025
	1,31	1	0,105	0,105
		2	0,056	0,025

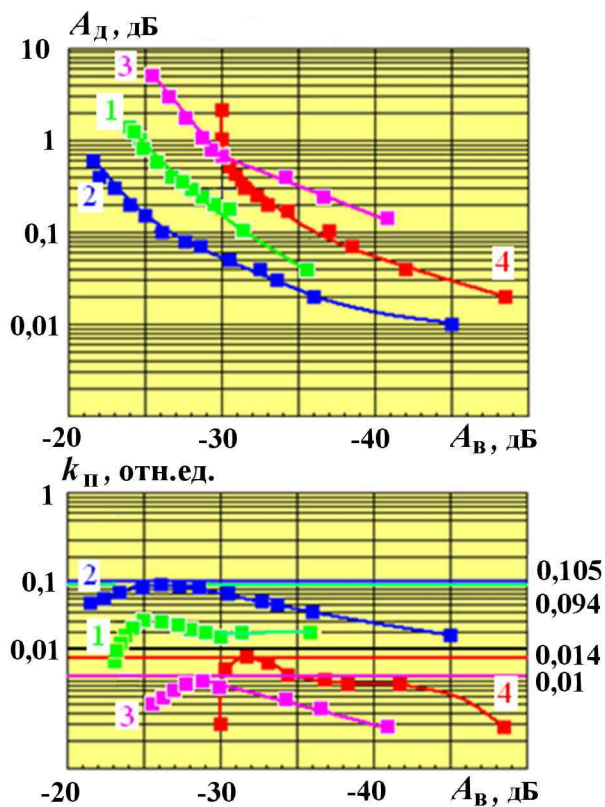


Рис. 9. Экспериментальные зависимости коэффициента дополнительных потерь A_d и коэффициента передачи бокового излучения k_{Π} от коэффициента вывода $A_{\text{В}}$ на длинах волн 1,55 и 1,31 мкм: 1, 2 — ввод в многомодовое волокно; 3, 4 — ввод в одномодовое волокно

устройстве со схемой, представленной на рис. 8. На рисунке также показаны прямые (со значениями на шкале справа), полученные расчетным путем при оптимальном значении $z = 1$ мм (данные из табл. 2). Кривые 1 и 2 представлены для многомодового приемного волокна на длинах волн 1,55 и 1,31 мкм соответственно, а кривые 3 и 4 — для одномодового приемного волокна на тех же длинах волн. Провести более точное сравнение расчетных и экспериментальных данных для выбранной схемы не представляется возможным, так как в эксперименте не измерялись изменения расстояния z при изменении координаты прижима x . Максимальный коэффициент передачи при вводе в одномодовое волокно составил 0,010–0,014, а в многомодовое 0,094–0,105.

Полученные результаты свидетельствуют о невысокой эффективности согласования изогнутого и приемного оптических волокон в устрой-

стве со схемой, представленной на рис. 8, что обусловлено сильным несовпадением размеров радиусов гауссовых лучей на входе приемного волокна.

Заключение

В результате проведенной работы предложена схема вывода излучения через боковую поверхность одномодового волокна на приемное ОУ в виде одномодового оптического волокна с использованием градиентной линзы на входе, позволяющая получить максимально возможную эффективность ввода до 0,56.

Разработана методика расчета оптимального положения приемного ОУ относительно изгиба для предложенной схемы и коэффициента передачи оптического излучения с боковой поверхности изогнутого волокна на выходной полюс приемного ОУ с использованием интеграла наложения гауссовых лучей.

Список литературы

1. Корнейчук В. И., Барба Н. Б., Дойжа Г. И. Анализ чувствительности приемных устройств ВОСП-СРК // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. 2010. № 2. С. 75–78.
2. US Patent 3936631. Optical fiber power tap. 1976. www.uspto.gov.
3. US Patent 3982123. Optical fiber power taps. 1976. www.patents.com.
4. US Patent 4270839. Directional optical fiber signal tapping assembly. 1981. www.uspto.gov.
5. US Patent 3931518. Optical fiber power taps. 1976. www.patents.com.
6. GB Patent 2126749. Optical fiber tap. 1984. www.patents.com.
7. US Patent 7116870. Broadband fiber optical tap. 2006. www.patents.com.
8. Продукция и решения для волоконно-оптических сетей связи. FCD-10B. www.o-link.ru.
9. КБ "Волоконно-оптические приборы". Ответитель-прищепка FOD-5503. www.fods.com.
10. Индикатор активных волокон Fujikura FID-25R/26R. www.4comt.ru.

11. Идентификатор оптических волокон. Модель OFI 400. Руководство по эксплуатации. www.fod.ru/pdf/manual/ofi400.pdf
12. US Patent 6640028. Bend-type fiber optical light injector. 2003. www.patents.com.
13. Шубин В. В. Волоконно-оптические системы и информационная безопасность. ГРОЦ. С.-Пб.: "Ива", 2006.
14. Iadicicco A., Paladino D., Moccia M. et al. Mode coupling and field distribution in sub-mm permanently bent single mode optical fields // *Optical & Laser Technology*. 2013. Vol. 47. P. 292–304.
15. Wang P., Wang Q., Farrell G. et al. Investigation of macrobending losses of standart single mode fiber with small bend radii // *Optical Technology Letters*. 2007. Vol. 49, No 9. P. 2133–2138.
16. Короленко П. В. Оптика когерентного излучения. Учеб. пособие. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 1997.
17. US Patent 4889403. Distribution optical fiber tap. 1989. www.patents.com.
18. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1968.
19. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.-Л.: Машиностроение, 1966.
20. Saruwatary M., Nawata K. Semiconductor laser to single-mode fiber coupling // *Appl. Optics*. 1979. Vol. 18, Issue 11. P. 1847–1856.
21. Ивченко С. Н., Шагалиев Р. М., Шубин В. В. Оценка предельных возможностей по перехвату информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. Мат. Юбилейной 20-й науч.-тех. конф. 27 июня — 1 июля 2011 г. С.-Пб.: Изд.-во политех. ун-та, 2011.

Статья поступила в редакцию 20.03.15.

A METHOD FOR CALCULATION OF THE EFFICIENCY OF RADIATION TRANSFER FROM A LATERAL SURFACE OF A CURVED SINGLE-MODE OPTICAL FIBER TO AN OPTICAL RECIEVER / Yu. V. Malykh, V. V. Shubin (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, N. Novgorod region).

A method used to calculate parameters of the radiation transfer from a lateral surface of a curved single-mode optical fiber to an optical receiver is described. The major characteristic of the radiation output from optical fiber and the major parameter of its efficiency – the lateral radiation transfer coefficient, kt – are considered. The paper presents the developed optical circuit of radiation transfer from the bend of optical fiber and the order of calculating an optimal position of a receiving single-mode optical device. The paper describes the procedure of calculating the efficiency of matching parameters of the optical receiver and the single-mode fiber bend, as well as losses at the interfaces between various media and losses due to the absorption during the radiation transfer process. The radiation transfer efficiency results obtained with the presented computational method are compared to data of experiments.

Keywords: bend in a single-mode optical fiber, transition losses, radiation transfer simulation method, a computational method for the efficiency of radiation input to fiber-optic devices.