

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЯЗИ В (2+1) GTWAVE ВОЛОКНАХ

А. В. Бочков, А. Н. Слобожанин, М. Г. Слобожанина, Д. В. Хмельницкий

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 456770, г. Снежинск Челябинской обл.

Предлагается расчетно-экспериментальный метод определения эффективных коэффициентов связи для излучения накачки в (2+1) GTWave волокнах. Приводятся выражения, полученные из аналитических решений для распределения мощности излучения накачки, которые позволяют определить значения данных коэффициентов, а также схема и результаты экспериментов по их измерению.

*Ключевые слова:* оптические волокна с многоэлементной первой оболочкой, GTWave волокна, эффективные коэффициенты связи, оптическая накачка.

### 1. Введение

Волоконные лазеры и усилители являются перспективными кандидатами для дальнейшего использования их в лазерных системах высокой мощности [1, 2]. В качестве активного элемента таких лазеров могут быть использованы волокна с многоэлементной первой оболочкой [3], которые также называются GTWave [4, 5] или DSCCP (distributed side-coupled cladding-pumped) [6] волокнами, при этом реализуется «боковая» схема накачки, т. е. излучение накачки вводится в активное волокно за счет оптического контакта активного волокна с одним или несколькими пассивными волокнами, что позволяет распределить тепловую нагрузку вдоль длины активного элемента. В работе [6] была предложена упрощенная модель распределения излучения накачки в (1+1)GTWave волокне (внутри внешней оболочки расположены одно активное и одно пассивное волокна) и приведены аналитические решения в рамках приближения сильной накачки [7] для распределения мощности накачки вдоль длины волокон, входящих в систему (1+1)GTWave, что позволило в работах [8, 9] произвести анализ данного типа волокон. В модели [6] связь между волокнами описывается эффективными коэффициентами связи – некими средними величинами по длине волокна, определяющими переход всего излучения накачки в целом (всех оптических мод).

В работе [10] данная модель накачки была расширена на случай (2+1)GTWave волокна (внутри внешней оболочки расположены два пассивных и одно активное волокна), при этом учитывались только попарные взаимодействия между волокнами системы, а пассивные волокна были приняты идентичными. В результате получены аналитические решения для распределения мощности накачки в волокнах системы (2+1)GTWave, а также произведен анализ данного типа волокон. Отметим, что при использовании волокон данного типа уже создан волоконный лазер выходной мощностью ~2 кВт [11].

В работе [12] нами предложен и апробирован расчетно-экспериментальный метод определения эффективных коэффициентов связи в (1+1)GTWave волокнах. В настоящей работе логика и приближения расчетно-экспериментального метода, предложенного в [12], распространяются на (2+1)GTWave волокна, что позволяет сформулировать метод определения эффективных коэффициентов связи в данном типе волокна. Из аналитических решений дифференциальных уравнений для распределения мощности накачки, записанных в рамках модели [10], получены выражения, которые позволяют определить значения данных коэффициентов. Также приводятся условия проведения и результаты экспериментов по измерению эффективных коэффициентов связи между волокнами в системе (2+1)GTWave.

## 2. Теория

Структура (2+1)GTWave волокна представлена на рис. 2. Во внутренней оболочке данного волокна располагается активное волокно 1, имеющее поглощающую сердцевину, и два пассивных волокна без сердцевины 2 и 3.



Рис. 1. Схематическое изображение (2+1)GTWave волокна

В работе [10] была предложена упрощенная физико-математическая модель распределения излучения накачки в (2+1)GTWave. В рамках этой модели волокна, расположенные во внутренней оболочке, оптически связаны попарно и связь между ними описывается эффективными коэффициентами связи (ниже опустим слово эффективные). Далее, аналогично [12] будем считать, что оптическое излучение вводится в торец одного или одновременно всех волокон из системы (2+1)GTWave равномерно по всему их сечению (в случае активного волокна излучение вводится в оболочку). Предположим, что в рассматриваемом спектральном диапазоне величины данных коэффициентов не зависят от длины волны оптического излучения.

Дифференциальные уравнения физико-математической модели, описывающей распределение излучения накачки в (2+1)GTWave волокне [10], допускают аналитическое решение в случае, если коэффициент поглощения активной области является постоянным вдоль длины волокна. Очевидно, что данная ситуация реализуется в двух случаях: случай слабого сигнала; случай сильной накачки. Выпишем соответствующие уравнения для случая одностороннего распространения излучения:

$$\begin{cases} \frac{dP_p(z)}{dz} = -(\gamma + \alpha + 2k_{ap})P_p(z) + k_{pa}(P_{pp}(z) + P_{ppp}(z)); \\ \frac{dP_{pp}(z)}{dz} = -(k_{pa} + k_p + \alpha)P_{pp}(z) + k_{ap}P_p(z) + k_pP_{ppp}(z); \\ \frac{dP_{ppp}(z)}{dz} = -(k_{pa} + k_p + \alpha)P_{ppp}(z) + k_{ap}P_p(z) + k_pP_{pp}(z), \end{cases} \quad (1)$$

где  $P_p(z)$  – распределение мощности накачки по длине активного волокна;  $P_{pp}(z)$  – распределение мощности накачки по длине пассивного волокна 2;  $P_{ppp}(z)$  – распределение мощности накачки по длине пассивного волокна 3;  $k_{ap}$  – коэффициент связи между активным и пассивными волокнами (доля мощности излучения накачки, переданная из активного волокна в каждое пассивное на участке  $dz$ );  $k_{pa}$  – коэффициент связи между пассивными волокнами и активным волокном (доля мощности излучения накачки, переданная из каждого пассивного волокна в активное на участке  $dz$ );  $k_p$  – коэффициент связи между пассивными волокнами (доля мощности излучения накачки, переданная из одного пассивного волокна в другое на участке  $dz$ );  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\gamma$  – коэффициент поглощения активной области. Систему (1) необходимо дополнить граничными условиями вида:

$$P_p(0) = P_p^0, P_{pp}(0) = P_{pp}^0, P_{ppp}(0) = P_{ppp}^0.$$

Для разделения эффектов поглощения излучения активной областью с передачей и потерями излучения будем рассматривать область спектра, в которой поглощение активной области мало, т. е.  $\gamma \ll k_{ap}$ ,  $\gamma \ll k_{pa}$ ,  $\gamma \ll k_p$  и  $\gamma \ll \alpha$ , и им можно пренебречь. В результате решения системы дифференциальных уравнений (1) с выбранными граничными условиями имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_p(z) = \frac{k_{pa}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left[ P_p^0 \left( 1 + \frac{2k_{ap}}{k_{pa}} e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right) + (P_{pp}^0 + P_{ppp}^0) \left( 1 - e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right) \right]; \\ P_{pp}(z) = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left[ P_p^0 \left( 1 - e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right) + P_{pp}^0 \left( 1 + \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p+k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right) + \right. \\ \left. + P_{ppp}^0 \left( 1 - \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p+k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right) \right]; \\ P_{ppp}(z) = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left[ P_p^0 \left( 1 - e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right) + P_{pp}^0 \left( 1 - \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p+k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right) + \right. \\ \left. + P_{ppp}^0 \left( 1 + \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p+k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right) \right]. \end{array} \right. \quad (2)$$

Если просуммировать выражения (2) и учесть, что  $P_p^0 + P_{pp}^0 + P_{ppp}^0 = P_{in}$ , то получим:

$$P(z) = P_p(z) + P_{pp}(z) + P_{ppp}(z) = P_{in} e^{-\alpha z}. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет определить значение коэффициента затухания при измерении суммарной мощности, выходящей из системы, при этом на входе излучение может подаваться, как во все три волокна, так и в одно из них.

Далее получим выражения для определения коэффициентов связи. Сначала рассмотрим случай, когда оптическое излучение вводится только в пассивное волокно 2, т. е. когда  $P_p^0 = P_{pp}^0 = 0$ , а  $P_{pp}^0 = P_{in}$ .

При этом решения (2), нормированные на вводимую мощность оптического излучения, можем переписать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} pp = \frac{P_{pp}(z)}{P_{in}} = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 + \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p+k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right); \\ CT_{act}^{pas2} = \frac{P_p(z)}{P_{in}} = \frac{k_{pa}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 - e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right); \\ CT_{pas3}^{pas2} = \frac{P_{ppp}(z)}{P_{in}} = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 - \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p+k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap}+k_{pa})z} \right), \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $CT_{act}^{pas2}(z)$  – отношение мощности в активном волокне в точке  $z$  к мощности, вводимой в пассивное волокно 2;  $CT_{pas3}^{pas2}(z)$  – отношение мощности в пассивном волокне 3 в точке  $z$  к мощности, вводимой в пассивное волокно 2. Аналогичным образом переписываем выражения (2) при введении излучения только в пассивное волокно 3, когда  $P_p^0 = P_{pp}^0 = 0$ , а  $P_{ppp}^0 = P_{in}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{pp} = \frac{P_{ppp}(z)}{P_{in}} = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 + \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p + k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right); \\ CT_{act}^{pas3} = \frac{P_p(z)}{P_{in}} = \frac{k_{pa}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 - e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right); \\ CT_{pas2}^{pas3} = \frac{P_{pp}(z)}{P_{in}} = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 - \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p + k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right), \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $CT_{act}^{pas3}$  – отношение мощности в активном волокне в точке  $z$  к мощности, вводимой в пассивное волокно 3;  $CT_{pas2}^{pas3}$  – отношение мощности в пассивном волокне 2 в точке  $z$  к мощности, вводимой в пассивное волокно 3. Теперь запишем нормированные выражения для последнего случая, когда излучение вводится только в активное волокно, т. е.  $P_{pp}^0 = P_{ppp}^0 = 0$ , а  $P_p^0 = P_{in}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} p(z) = \frac{P_p(z)}{P_{in}} = \frac{k_{pa}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 + \frac{2k_{ap}}{k_{pa}} e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right); \\ CT_{pas2}^{act} = \frac{P_{pp}(z)}{P_{in}} = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 - e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right); \\ CT_{pas3}^{act} = \frac{P_{ppp}(z)}{P_{in}} = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 - e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right), \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $CT_{pas2}^{act}(z)$  – отношение мощности в пассивном волокне 2 в точке  $z$  к мощности, вводимой в активное волокно;  $CT_{pas3}^{act}(z)$  – отношение мощности в пассивном волокне 3 в точке  $z$  к мощности, вводимой в активное волокно.

В случае если  $\alpha \ll k_{ap}$ ,  $\alpha \ll k_{pa}$ ,  $\alpha \ll k_p$ , можно разделить эффекты передачи и потерь излучения. В результате системы (4)–(6) можно переписать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} p = p_a = \frac{k_{pa}}{2k_{ap} + k_{pa}} \left( 1 + \frac{2k_{ap}}{k_{pa}} e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right) \\ pp = p_{pp} = p_p = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} \left( 1 + \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p + k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right) \\ CT_{pas2}^{act} = CT_{pas3}^{act} = CT_{ap} = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} \left( 1 - e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right) \\ CT_{act}^{pas2} = CT_{act}^{pas3} = CT_{pa} = \frac{k_{pa}}{2k_{ap} + k_{pa}} \left( 1 - e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right) \\ CT_{pas3}^{pas2} = CT_{pas2}^{pas3} = CT_p = \frac{k_{ap}}{2k_{ap} + k_{pa}} \left( 1 - \left( 1 + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} \right) e^{-(2k_p + k_{pa})z} + \frac{k_{pa}}{2k_{ap}} e^{-(2k_{ap} + k_{pa})z} \right) \end{array} \right. \quad (7)$$

В результате согласно (7) для определения коэффициентов связи получим три набора выражений:

$$k_{ap}z = F_{ap}^C = -\frac{CT_{ap}}{2CT_{ap} + CT_{pa}} \ln \left( 1 - (2CT_{ap} + CT_{pa}) \right),$$

$$k_{pa}z = F_{pa}^C = -\frac{CT_{pa}}{2CT_{ap} + CT_{pa}} \ln\left(1 - (2CT_{ap} + CT_{pa})\right), \quad (8)$$

$$k_pz = F_p^C = -\frac{1}{2} \ln\left(1 - (2CT_p + CT_{pa})\right) + \frac{1}{2} \frac{CT_{pa}}{2CT_{ap} + CT_{pa}} \ln\left(1 - (2CT_{ap} + CT_{pa})\right),$$

$$k_{ap}z = F_{ap}^{p1} = -\frac{1}{2} \frac{1 - p_a}{1 - (p_a - CT_{pa})} \ln(p_a - CT_{pa}),$$

$$k_{pa}z = F_{pa}^{p1} = -\frac{CT_{pa}}{1 - (p_a - CT_{pa})} \ln(p_a - CT_{pa}), \quad (9)$$

$$k_pz = F_a^{p1} = -\frac{1}{2} \ln(2p_p + CT_{pa} - 1) + \frac{1}{2} \frac{CT_{pa}}{1 - (p_a - CT_{pa})} \ln(p_a - CT_{pa})$$

и

$$k_{ap}z = F_{ap}^{p2} = -\frac{1}{2} \frac{1 - p_a}{2 - (p_a + p_p + CT_p)} \ln\left(\left(p_a + p_p + CT_p\right) - 1\right),$$

$$k_{pa}z = F_{pa}^{p2} = -\frac{1 - (p_p + CT_p)}{2 - (p_a + p_p + CT_p)} \ln\left(\left(p_a + p_p + CT_p\right) - 1\right), \quad (10)$$

$$k_pz = F_p^{p2} = -\frac{1}{2} \ln(p_p - CT_p) + \frac{1}{2} \frac{1 - (p_p + CT_p)}{2 - (p_a + p_p + CT_p)} \ln\left(\left(p_a + p_p + CT_p\right) - 1\right).$$

Теперь сформулируем основные этапы предлагаемого расчетно-экспериментального метода определения коэффициентов связи в (2+1)GTWave волокнах:

1. В ходе проведения эксперимента для набора длин волокна измеряются значения мощности на выходе активного и пассивных волокон 2 и 3 при вводе излучения только в пассивное волокно 2, только в пассивное волокно 3 и только в активное волокно, а затем вычисляются нормированные величины  $p$ ,  $pp$ ,  $ppp$ ,  $CT_{act}^{pas2}$ ,  $CT_{act}^{pas3}$ ,  $CT_{pas3}^{pas2}$ ,

$CT_{pas2}^{pas3}$ ,  $CT_{pas2}^{act}$ ,  $CT_{pas3}^{act}$  и формируются массивы данных  $p_a$ ,  $p_p$ ,  $CT_{ap}$ ,  $CT_{pa}$  и  $CT_p$ .

2. Используя полученные в эксперименте данные, определяем  $F_{ap}^C$ ,  $F_{ap}^{p1}$ ,  $F_{ap}^{p2}$ ,  $F_{pa}^C$ ,  $F_{pa}^{p1}$ ,  $F_{pa}^{p2}$  и  $F_p^C$ ,  $F_p^{p1}$ ,  $F_p^{p2}$  для каждой из длин волокна.

3. По совокупности полученных данных (например, методом наименьших квадратов) определяем значения коэффициентов связи  $k_{ap}$ ,  $k_{pa}$  и  $k_p$ .

### 3. Эксперимент

В этом разделе рассмотрим экспериментальную реализацию описанного выше расчетно-экспериментального метода. Объектом исследования выступает одномодовое итербиевое (2+1)GTWave волокно (активное волокно 14/185 мкм,  $NA_{core} = 0,08$ ,  $NA_{clad} = 0,38$ ; пассивное волокно 190 мкм,  $NA = 0,38$ ). Для проверки спектральной независимости коэффициентов связи измерения производились на нескольких длинах волн оптического излучения с использованием источников, удовлетворяющих выдвинутому в предлагаемом методе требованиям:  $\lambda_1 = 1089$  нм,  $P_{in}^{1089} = 2,3$  мВт;  $\lambda_2 = 1300$  нм,  $P_{in}^{1300} = 11,8$  мВт.

Измерения проводились на двух кусках (2+1)GTWave волокна (выбранных из волокна одной вытяжки) начальной длины  $\sim 90$  см последовательным ее уменьшением. На входе в систему излучение вводилось по очереди сначала в пассивные волокна, а затем в активное волокно, при этом

в каждом из случаев на выходе измерялась мощность излучения, выходящего с каждого из пассивных волокон и активного волокна в отдельности. Результаты измерений показаны на рис. 2 и 3 для излучения на длинах волн  $\lambda = 1089$  нм и  $\lambda = 1300$  нм соответственно. В связи с тем что пассивные волокна принимаются идентичными, то и результаты измерений при вводе в пассивные волокна нанесены вместе – рис. 2,а и рис. 3,а. Данное предположение подтверждается результатами измерений при вводе излучения в активное волокно – рис. 2,б и рис. 3,б.

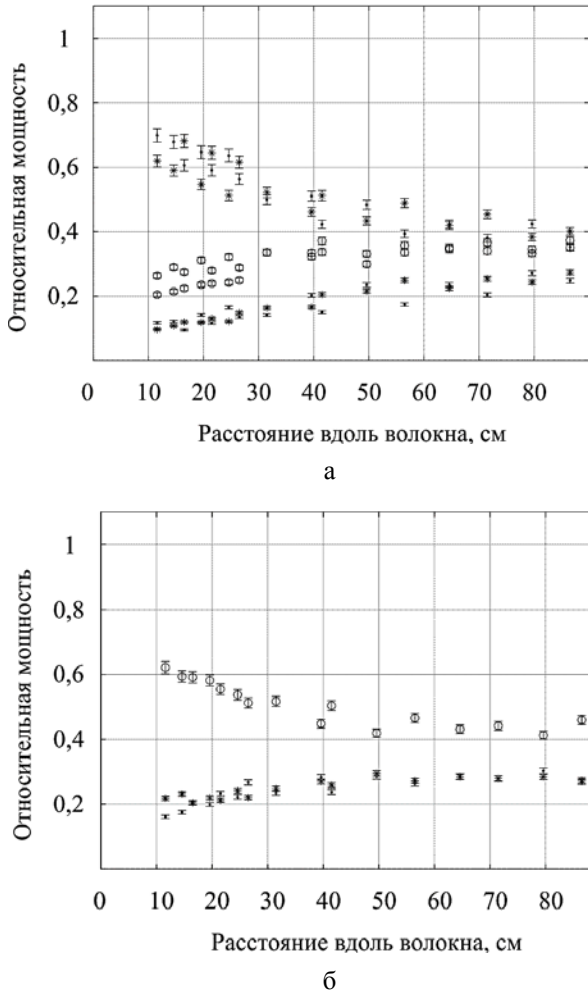


Рис. 2. Экспериментальные зависимости относительных мощностей оптического излучения ( $\lambda = 1089$  нм) от длины волокон системы (2+1)GTWave при вводе излучения: а – в пассивные волокна (\* и +); б – в активное волокно (°)

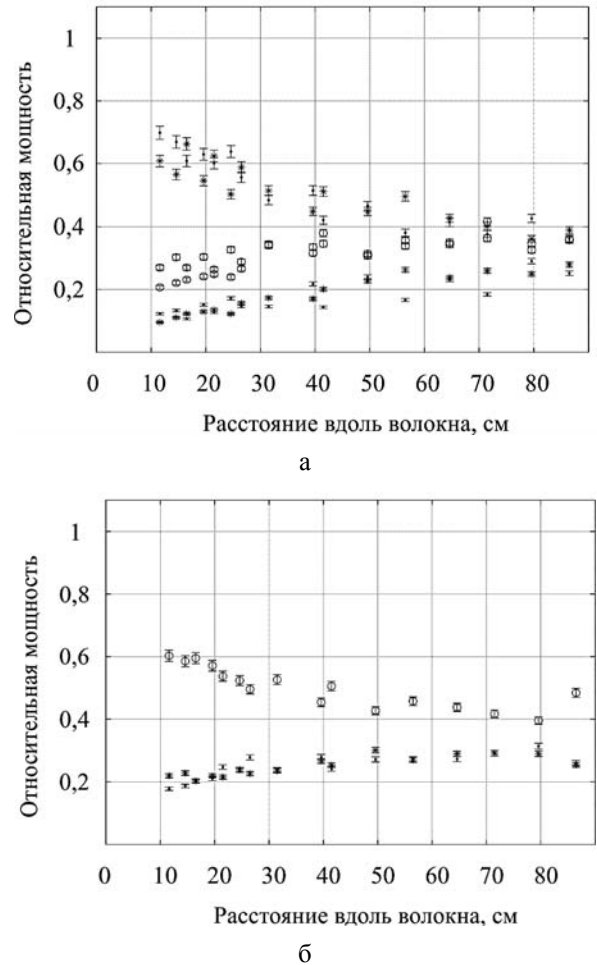


Рис. 3. Экспериментальные зависимости относительных мощностей оптического излучения ( $\lambda = 1300$  нм) от длины волокон системы (2+1)GTWave при вводе излучения: а – в пассивные волокна (\* и +); б – в активное волокно (°)

Далее переходим к пункту 2 предлагаемого расчетно-экспериментального метода и определяем для полученных в эксперименте данных значения величин  $F_{ap}^C, F_{ap}^{p1}, F_{ap}^{p2}; F_{pa}^C, F_{pa}^{p1}, F_{pa}^{p2}$  и  $F_p^C,$

$F_p^{p1}, F_p^{p2}$  для каждой из длин волокна. Затем методом наименьших квадратов (МНК) определяем искомые коэффициенты связи (пункт 3). Ниже последовательно приведем результаты, полученные для  $\lambda = 1089$  нм и  $\lambda = 1300$  нм.

Для коэффициентов связи на длине волны  $\lambda = 1089$  нм:

$$\begin{aligned} k_{ap} &= 1,17 \pm 0,18 \text{ (м}^{-1}\text{)}; \\ k_{pa} &= 1,46 \pm 0,28 \text{ (м}^{-1}\text{)}; \\ k_p &= 0,68 \pm 0,07 \text{ (м}^{-1}\text{)}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} k_{ap} &= 1,29 \pm 0,29 \text{ (м}^{-1}\text{)}; \\ k_{pa} &= 1,62 \pm 0,52 \text{ (м}^{-1}\text{)}; \\ k_p &= 0,66 \pm 0,14 \text{ (м}^{-1}\text{)}. \end{aligned} \quad (9)$$

На рис. 4 отображены экспериментальные данные и диапазон допустимых значений согласно выражениям (2) с учетом ошибки измерения мощности источника ( $\pm 3\%$ ) и ошибок, с которыми определены коэффициенты связи.

Далее, так же как и в предыдущем случае отобразим полученные для  $\lambda = 1300$  нм результаты графически (рис. 5).

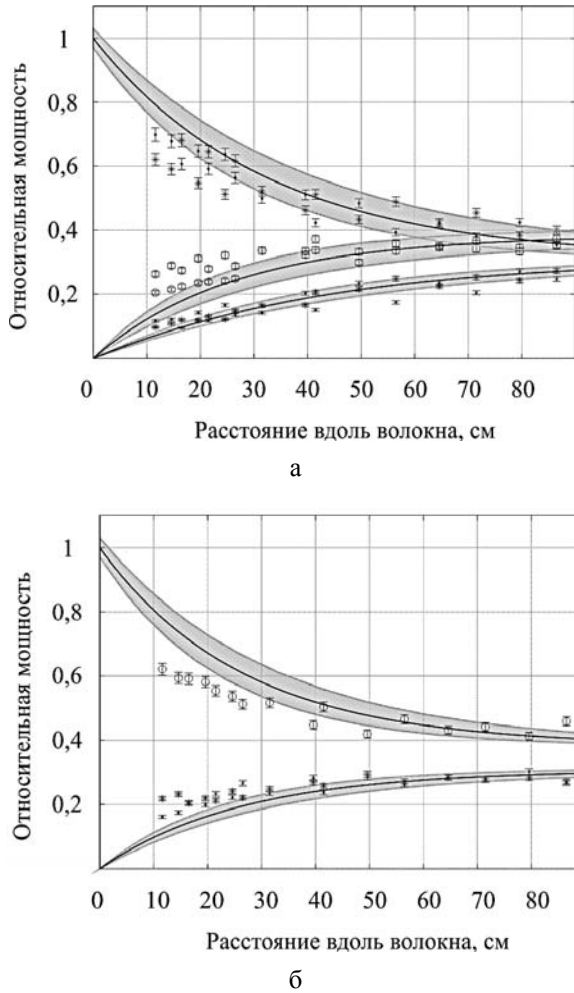


Рис. 4. Экспериментальные данные по распределению мощности оптического излучения ( $\lambda = 1089$  нм) вдоль длины волокон системы (2+1)GTWave и расчетный интервал допустимых значений при вводе излучения: а – в пассивные волокна (\* и +); б – в активное волокно (°)

Перейдем к анализу экспериментальных данных для  $\lambda = 1300$  нм. Для коэффициентов связи в этом случае имеем:

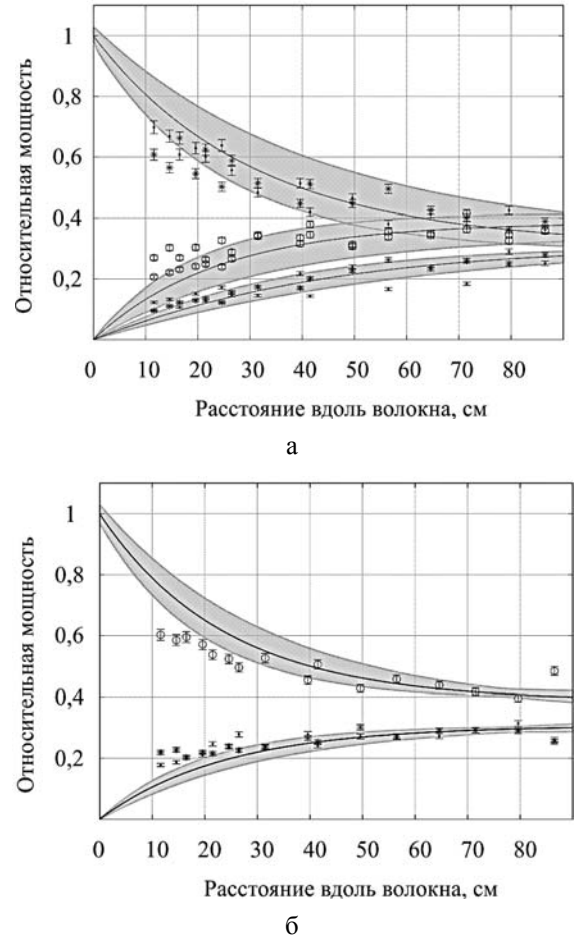


Рис. 5. Экспериментальные данные по распределению мощности оптического излучения ( $\lambda = 1300$  нм) вдоль длины волокон системы (2+1)GTWave и расчетный интервал допустимых значений при вводе излучения: а – в пассивные волокна (\* и +); б – в активное волокно (°)

#### 4. Обсуждение результатов

В представленных экспериментах были произведены измерения параметров необходимых, согласно предлагаемому в первом разделе данной работы расчетно-экспериментальному методу, для

определения коэффициентов связи (эффективных коэффициентов связи), описывающих переход оптического излучения между волокнами, расположенными во внутренней оболочке системы (2+1)GTWave. Данный метод является логическим развитием расчетно-экспериментального метода определения коэффициентов связи в (1+1)GTWave волокнах, предложенного в работе [12]. Графическое отображение полученных в эксперименте результатов, а также теоретически рассчитанного диапазона допустимых значений для распределения мощностей в волокнах системы (2+1)GTWave, представленное на рис. 4–5, показывает, что точность предсказания, как и в случае (1+1)GTWave волокна [12], увеличивается с увеличением длины волокна. Вариантом объяснения этого, как и в [12], предлагается тот факт, что в выражениях (2) фигурируют коэффициенты связи, усредненные по длине волокна, и чем больше значение длины, тем данное предположение становится более применимым. Однако несмотря на расхождение при малых длинах, данный расчетно-экспериментальный метод позволяет удовлетворительно описывать экспериментальные данные (более 60 % экспериментальных данных описываются получившимися средними значениями), к тому же при использовании (2+1)GTWave волокон на практике для создания лазеров или усилителей применяются достаточно длинные их участки (не менее 5 м), т. е. предлагаемые теоретические оценки являются справедливыми.

Сравнивая значения коэффициентов связи (8) и (9) видим, что они совпадают с учетом доверительных интервалов, т. е.  $k_{ap}^{1089} \approx k_{ap}^{1300}$ ,  $k_{pa}^{1089} \approx k_{pa}^{1300}$  и  $k_p^{1089} \approx k_p^{1300}$ , поэтому наше предположение о спектральной независимости можно считать подтвержденным. Данный результат позволяет предположить, что и в области типичной накачки иттербия  $\lambda_p \sim 980$  нм значения коэффициентов связи не будут менять свои значения.

Таким образом, применение предлагаемого расчетно-экспериментального метода для определения коэффициентов связи между волокнами системы (2+1)GTWave позволяет определить значения данных коэффициентов для оптического излучения из области типичной накачки (975, 915 нм), несмотря на то, что измерения производятся в спектральном диапазоне длин волн малого поглощения активной области.

Необходимо отметить, что если полученные значения коэффициентов связи совпадают между

собой (попарно или все три), то для получения единого коэффициента связи должен быть использован весь набор соответствующих экспериментальных данных одновременно.

## Заключение

В работе описан расчетно-экспериментальный метод определения коэффициентов связи между волокнами, расположенными во внутренней оболочке (2+1)GTWave волокна, который является логическим дополнением расчетно-экспериментального метода, предложенного в работе [12], для определения коэффициентов связи в (1+1)GTWave волокнах. Все рассуждения производятся в рамках упрощенной физико-математической модели распределения излучения накачки [10]. Из аналитических решений дифференциальных уравнений данной модели были получены выражения, которые, имея необходимый набор экспериментальных данных, позволяют определить значения коэффициентов связи. В разделах 3 и 4 работы приводятся результаты экспериментов, значения коэффициентов связи, определенных указанным методом, а также анализ полученных результатов. Рассматриваемый метод позволяет экспериментально установить значения коэффициентов связи для дальнейшего использования их при численном проектировании волоконных лазеров и усилителей, в качестве активного элемента которых выступают (2+1)GTWave волокна.

## Список литературы

1. Zervas M. N., Codemard Ch. A., High power fiber lasers: a review // IEEE J. of Selected Topics in Quant. Elect. 2014. Vol. 20, № 5. P. 0904123.
2. Zervas M. N., High power ytterbium-doped fiber lasers – fundamentals and applications // Int. J. of Mod. Phys. B. 2014. Vol. 28, № 12. P. 1442009.
- 3/ Мелькумов М. А., Буфетов И. А., Бубнов М. М., Шубин А. В., Семенов С. Л., Дианов Е. М., Распределение излучения накачки в лазерных волоконных световодах с многоэлементной первой оболочкой // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 11. С. 996.,
4. Grudinin A. B., Turner P. W., Ibsen M., Durkin M. K., Nilsson J., Payne D. N., Zervas M. N., Multi-fibre arrangements for high power fibre lasers and amplifiers // U.S. patent 6826335, 2004.



5. Norman S., Zervas M., Appleyard A., Durkin M., Horley R., Varnham M., Nilsson J., Jeong Y., Latest development of high power fiber lasers in SPI // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5335. P. 229.
6. Huang Zh., Cao J., Guo Sh., Chen J., Xiaojun X., Leng J., Model of distributed side-coupled cladding-pumped fiber lasers // Advanced Solid-State Lasers Congress Technical Digest, ATu3A.27, 2013.
- 7/ Kelson I., Hardy A. A., Strongly pumped fiber lasers // IEEE J. of Quantum Elect. 1998. Vol. 34, № 9. P. 1570.
- 8/ Huang Zh., Cao J., Guo Sh., Hou J., Chen J., The characteristics of pump light in side-coupled cladding-pumped fibers // Optical Fiber Technology. 2013. Vol. 19. P. 293.
9. Huang Zh., Cao J., Guo Sh., Chen. J., Xu X. // Appl. Opt. 2014. Vol. 53 (10). P. 2187.
10. Bochkov A. V., Slobozhanina M. G., The features of the optical pumping active fibers with three-piece inner clad // Optical Fiber Technology. 2017. V. 33. P. 64–70.
11. Zhan H., Y. Wang, K. Peng, Zh. Wang, L. Ni, X. Wang, F. Jing, A. Lin, 2 kW (2+1) GT-wave fiber amplifier // Laser Phys. Lett. 2016. V. 13. P. 045103.
12. Бочков А. В., Слобожанин А. Н., Слобожанина М. Г., Хмельницкий Д. В., Метод определения эффективных коэффициентов связи в (1+1)GTWave волокнах. См. настоящий выпуск. С. 3–9.

Статья поступила в редакцию 02.02.2018