

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СВЯЗИ В (1+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 (1+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

За последние несколько десятилетий своего бурного развития мощные волоконные лазеры и усилители прочно заняли свою нишу в различных областях науки и техники [1]. Одним из вариантов их исполнения является использование в качестве активного элемента волокон с многоэлементной первой оболочкой [2], которые также называются GTWave [3, 4] или DSCCP (distributed side-coupled cladding-pumped) [5] активными волокнами. В этом случае реализуется «боксовая» схема накачки – 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. В работе [5] была предложена упрощенная модель (1+1)GTWave активного волокна (внутри внешней оболочки расположены одно активное и одно пассивное волокна), в которой связь между волокнами описывается эффективными коэффициентами связи – некими средними величинами по длине волокна, определяющими переход всего излучения накачки в целом (всех оптических мод). Также в работе [5] были приведены аналитические решения в рамках приближения сильной накачки [7], которые позволяют произвести анализ распределения накачки в (1+1)GTWave волокнах [6]. При использовании волокон этого типа удалось создать одномодовый волоконный лазер выходной

мощностью 1 кВт [8]. Несмотря на применение сравнения результатов численного анализа, в котором использовались конкретные значения эффективных коэффициентов связи, и экспериментальных данных при реализации цельноволокнового суперфлуоресцентного лазерного иттербиевого источника [9], до последнего времени не было представлено метода их непосредственного измерения.

Настоящая работа посвящена описанию расчетно-экспериментального метода определения эффективных коэффициентов связи в (1+1)GTWave волокнах. Из аналитических решений дифференциальных уравнений для распределения мощности накачки, записанных в рамках модели [5], получены выражения, которые позволяют определить значения данных коэффициентов. Также приводятся условия проведения и результаты экспериментов по измерению эффективных коэффициентов связи между волокнами в системе (1+1)GTWave.

### 2. Теория

Структура (1+1)GTWave волокна представлена на рис. 1. Во внутренней оболочке данного волокна располагается активное волокно 1, имеющее поглощающую сердцевину, и пассивное волокно без сердцевины 2. При практическом использовании излучение накачки вводится в пас-

сивное волокно 2, из которого передается в оболочку активного волокна 1 посредством оптической связи. В общем же случае излучение накачки может вводиться во все рассматриваемые волокна.

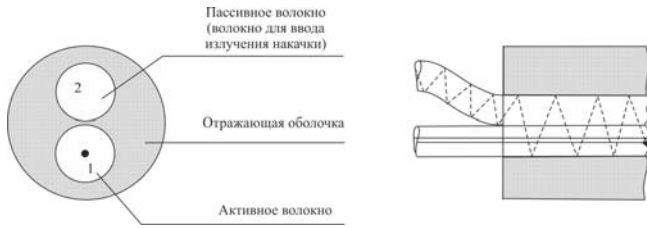


Рис. 1. Схематическое изображение активного (1+1)GTWave волокна

В работах [5, 6] была предложена упрощенная физико-математическая модель распределения излучения накачки в (1+1)GTWave. В рамках этой модели, как уже говорилось, оптическая связь между волокнами, расположенными во внутренней оболочке описывается эффективными коэффициентами связи (далее опустим слово эффективные). Далее будем считать, что оптическое излучение вводится в торец одного или одновременно всех волокон из системы (1+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 (1+1)GTWave [5, 6], допускают аналитическое решение в случае, если коэффициент поглощения активной области является постоянным вдоль длины волокна. Очевидно, что данная ситуация реализуется в двух случаях: слабого сигнала; случай сильной накачки. Выпишем соответствующие уравнения для случая одностроннего распространения излучения:

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

где  $P_p(z)$  – распределение мощности накачки по длине активного волокна;  $P_{pp}(z)$  – распределение мощности накачки по длине пассивного волокна;  $k_{ap}$  – коэффициент связи между активным и пассивным волокнами (доля мощности излучения накачки, переданная из активного волокна в пассив-

ное на участке  $dz$ , отнесенная к длине данного участка);  $k_{pa}$  – коэффициент связи между пассивным и активным волокнами (доля мощности излучения накачки, переданная из пассивного волокна в активное на участке  $dz$ , отнесенная к длине данного участка);  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\gamma$  – коэффициент поглощения активной области. Систему (1) необходимо дополнить расширенными относительно работ [5, 6] граничными условиями вида:

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

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

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

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

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

Выражение (3) позволяет определить значение коэффициента затухания при измерении суммарной мощности, выходящей из системы, при этом на входе излучение может подаваться, как в оба 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, т. е. когда  $P_p^0 = 0$ , а  $P_{pp}^0 = P_{in}$ . При этом решения (2), нормированные на начальную мощность накачки, можем переписать в виде:

$$\begin{cases} PP(z) = \frac{P_{pp}(z)}{P_{pp}^0} = \frac{P_{pp}(z)}{P_{in}} = \frac{k_{pa}}{k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( \frac{k_{ap}}{k_{pa}} + e^{-(k_{ap} + k_{pa})z} \right); \\ CT_{act}(z) = \frac{P_p(z)}{P_p^0} = \frac{P_p(z)}{P_{in}} = \frac{k_{pa}}{k_{ap} + k_{pa}} e^{-\alpha z} \left( 1 - e^{-(k_{ap} + k_{pa})z} \right). \end{cases} \quad (4)$$

$CT_{act}(z)$  – отношение мощности в активном волокне в точке  $z$  к мощности, вводимой в пассивное волокно системы (1+1)GTWave. Аналогичным образом переписываем выражения (2) при введении излучения только в активное волокно, когда  $P_p^0 = P_{in}$ , а  $P_{pp}^0 = 0$ :

$$\begin{cases} p = \frac{P_p(z)}{P_p^0} = \frac{P_p(z)}{P_{in}} = \frac{k_{ap}}{k_{ap} + k_{pa}} e^{-az} \left( \frac{k_{pa}}{k_{ap}} + e^{-(k_{ap} + k_{pa})z} \right); \\ CT_{pas} = \frac{P_{pp}(z)}{P_p^0} = \frac{P_{pp}(z)}{P_{in}} = \frac{k_{ap}}{k_{ap} + k_{pa}} e^{-az} \left( 1 - e^{-(k_{ap} + k_{pa})z} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Если  $\alpha \ll k_{ap}$ ,  $\alpha \ll k_{pa}$ , можно разделить эффекты передачи и потерь излучения. В результате, согласно (4) и (5), для коэффициентов связи получим:

$$\begin{aligned} k_{ap}z = f_{ap}^C &= \frac{CT_{pas}}{CT_{act} + CT_{pas}} \ln \left( 1 - (CT_{act} + CT_{pas}) \right); \\ k_{pa}z = f_{pa}^C &= \frac{CT_{act}}{CT_{act} + CT_{pas}} \ln \left( 1 - (CT_{act} + CT_{pas}) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

и

$$\begin{aligned} k_{ap}z = f_{ap}^p &= \frac{1-p}{2-(p+pp)} \ln \left( (p+pp) - 1 \right); \\ k_{pa}z = f_{pa}^p &= \frac{1-pp}{2-(p+pp)} \ln \left( (p+pp) - 1 \right). \end{aligned} \quad (7)$$

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

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

2. Используя полученные экспериментальные данные, определяем  $f_{ap}^C$ ,  $f_{ap}^p$ ,  $f_{pa}^C$  и  $f_{pa}^p$ , для каждой из длин волокна.

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

### 3. Эксперимент

В этом разделе рассмотрим экспериментальную реализацию описанного выше расчетно-экспериментального метода. Объектом исследования выступает одномодовое иттербиевое (1+1)GTWave волокно (активное волокно 6/125 мкм,  $NA_{core} = 0,13$ ,  $NA_{clad} = 0,38$ ; пассивное волокно 125 мкм,  $NA = 0,38$ ). Для проверки спектральной независимости коэффициентов связи измерения производились на нескольких длинах волн оптического излучения с использованием источников, удовлетворяющих выдвинутым 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 (1+1)GTWave (выбранных из волокна одной вытяжки) начальной длины  $\sim 60$  см последовательным ее уменьшением. На входе в систему излучение вводилось сначала в пассивное, а затем в активное волокно, при этом в каждом из случаев на выходе измерялась мощность излучения, выходящего с пассивного 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.

Далее переходим к пункту 2 предлагаемого расчетно-экспериментального метода и определяем для полученных в эксперименте данных значения величин  $f_{ap}^C$ ,  $f_{ap}^p$ ,  $f_{pa}^C$  и  $f_{pa}^p$  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:

$$\begin{aligned} k_{ap} &= 1,97 \pm 0,19 \text{ (м}^{-1}\text{)}; \\ k_{pa} &= 1,21 \pm 0,20 \text{ (м}^{-1}\text{)}. \end{aligned} \quad (8)$$

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.

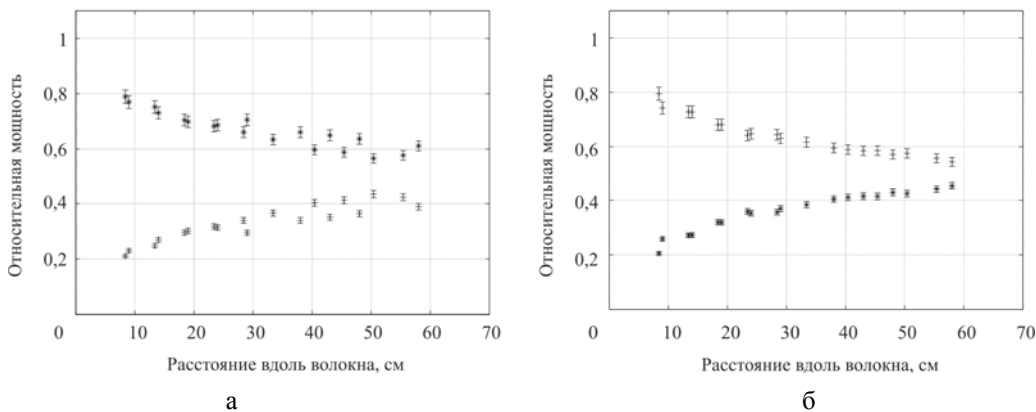


Рис. 2. Экспериментальные зависимости относительных мощностей оптического излучения ( $\lambda = 1089$  нм) от длины волокон системы (1+1)GTWave при вводе излучения: а – в пассивное волокно (\*); б – в активное волокно(+)

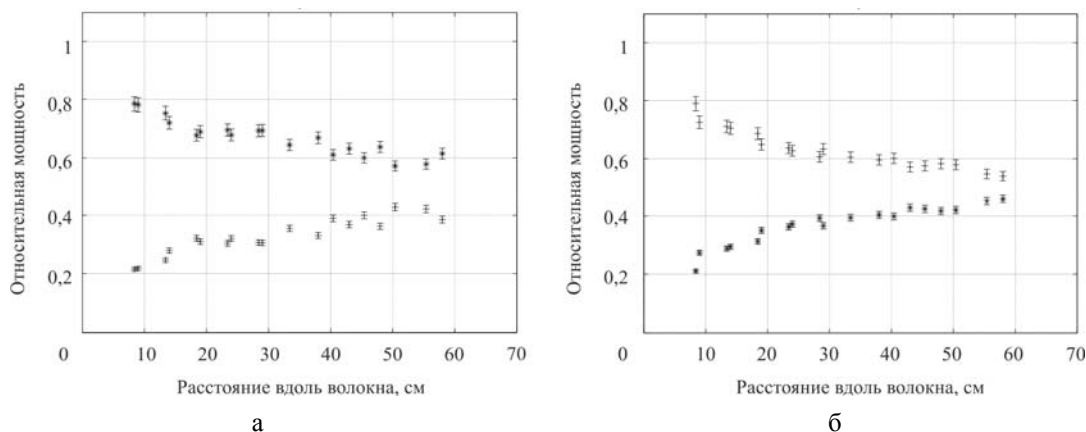


Рис. 3. Экспериментальные зависимости относительных мощностей оптического излучения ( $\lambda = 1300$  нм) от длины волокон системы (1+1)GTWave при вводе излучения: а – в пассивное волокно (\*); б – в активное волокно(+)

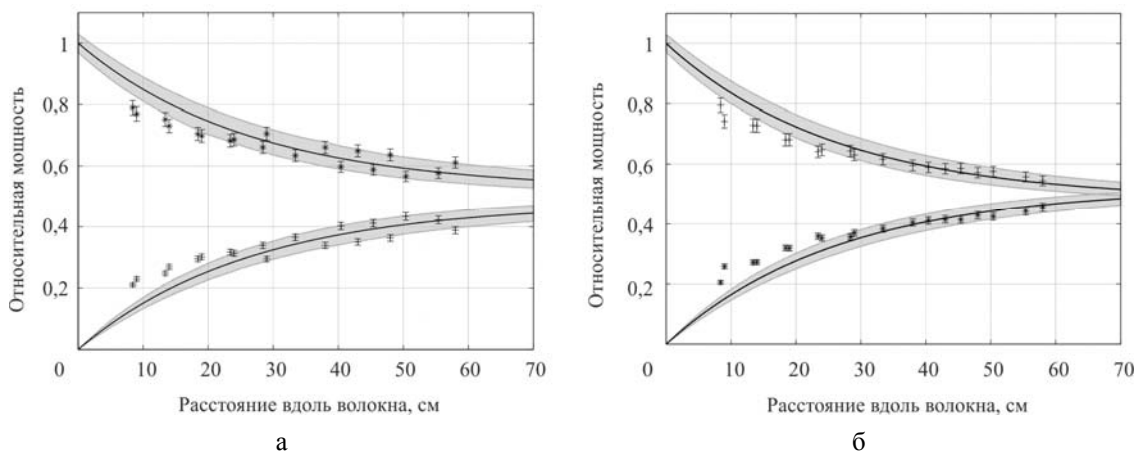


Рис. 4. Экспериментальные данные по распределению мощности оптического излучения ( $\lambda = 1089$  нм) вдоль длины волокон системы (1+1)GTWave и расчетный интервал допустимых значений при вводе излучения: а – в пассивное волокно (\*); б – в активное волокно(+)

Согласно (8) коэффициенты связи могут быть приняты равными друг другу  $k_{ap} = k_{pa} = k$ . В этом случае МНК можем определить данный параметр,

при этом необходимо учитывать все экспериментальные данные одновременно:

$$k = 1,89 \pm 0,20 \text{ (м}^{-1}\text{)}. \quad (9)$$

На рис. 5 отображены результаты всех экспериментов (излучение вводится в пассивное волокно и излучение вводится в активное волокно) и диапазон допустимых значений согласно выражениям (2) с учетом ошибки измерения мощности источника ( $\pm 3\%$ ) и ошибки, с которой определен коэффициент связи.

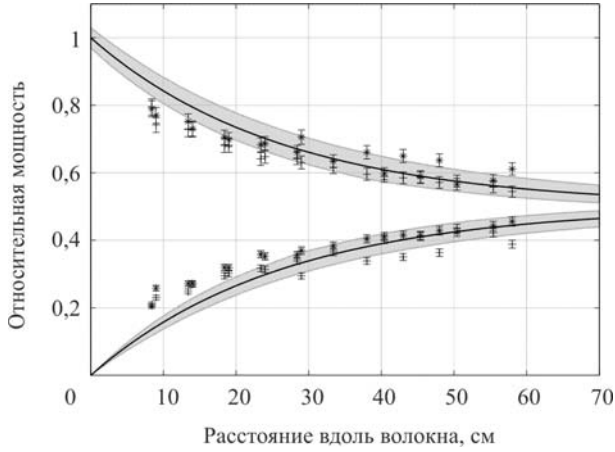


Рис. 5. Экспериментальные данные по распределению мощности оптического излучения ( $\lambda = 1089$  нм) вдоль длины волокон системы (1+1)GTWave и расчетный интервал допустимых значений при равенстве коэффициентов связи между волокнами

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

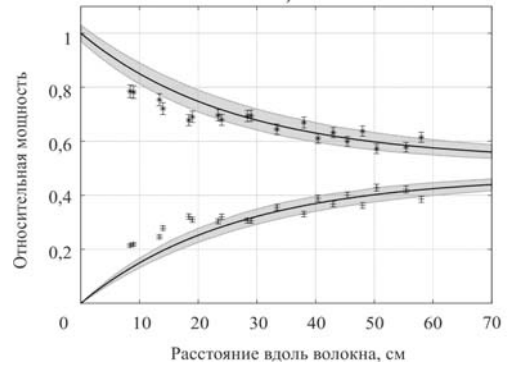
$$\begin{aligned} k_{ap} &= 2,01 \pm 0,24 \text{ (м}^{-1}\text{)}; \\ k_{pa} &= 1,80 \pm 0,20 \text{ (м}^{-1}\text{)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее, так же как и в предыдущем случае, отобразим полученные для  $\lambda = 1300$  нм результаты графически – рис. 6.

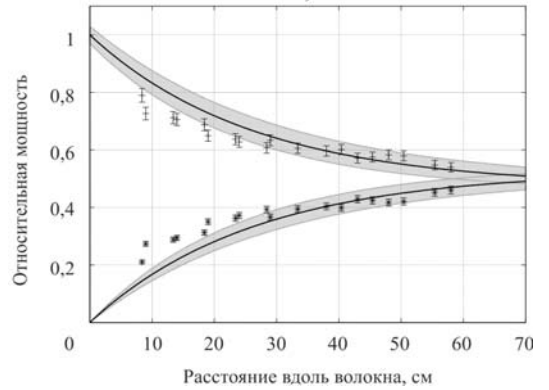
Значения коэффициентов связи (10) с учетом доверительных интервалов можно принять равными  $k_{ap} = k_{pa} = k$ . Значение данного коэффициента определяем МНК, используя всю совокупность данных для  $\lambda = 1300$  нм:

$$k = 1,90 \pm 0,23 \text{ (м}^{-1}\text{)}. \quad (11)$$

На рис. 7 отображены экспериментальные результаты и диапазон допустимых значений согласно выражениям (4)–(5) с учетом ошибки измерения мощности источника ( $\pm 3\%$ ) и ошибки, с которой определен коэффициент связи.



а



б

Рис. 6. Экспериментальные данные по распределению мощности оптического излучения ( $\lambda = 1300$  нм) вдоль длины волокон системы (1+1)GTWave и расчетный интервал допустимых значений при вводе излучения: а – в пассивное волокно (\*); б – в активное волокно(+)

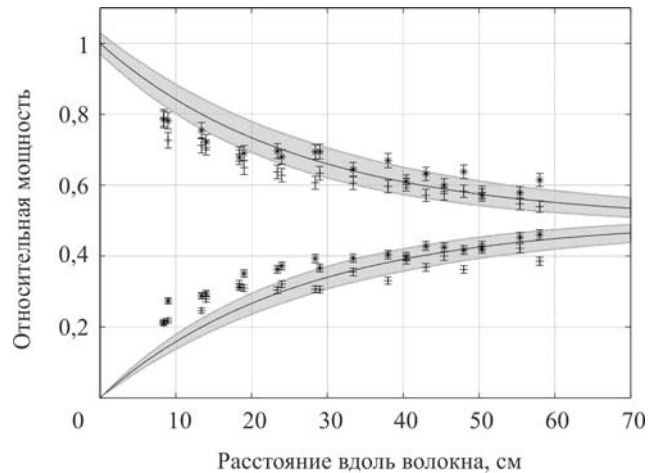


Рис. 7. Экспериментальные данные по распределению мощности оптического излучения ( $\lambda = 1300$  нм) вдоль длины волокон системы (1+1)GTWave и расчетный интервал допустимых значений при равенстве коэффициентов связи между волокнами

#### 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 системы (1+1)GTWave. Графическое отображение полученных в эксперименте результатов, а также теоретически рассчитанного коридора допустимых значений для распределения мощностей в волокнах системы (1+1)GTWave (см. рис. 4–7) показывает, что с увеличением длины все больше экспериментальных точек попадают в коридор теоретического предсказания. Одним из вариантов объяснения этого может служить тот факт, что в выражениях (2) фигурируют коэффициенты связи, усредненные по длине волокна, и чем больше значение длины, тем данное предположение становится более применимым. Несмотря на расхождение при малых длинах, данный расчетно-экспериментальный метод позволяет удовлетворительно описывать экспериментальные данные (более 70 % экспериментальных данных описываются получившимися средними значениями), к тому же при использовании (1+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 (10), а также (9) и (11), видим, что они совпадают с учетом доверительных интервалов, т. е.  $k_{ap}^{1089} \approx k_{ap}^{1300}$  и  $k_{pa}^{1089} \approx k_{pa}^{1300}$ , и  $k^{1089} \approx k^{1300}$ , поэтому наше предположение о спектральной независимости можно считать подтвержденным. В результате имеем, что при спектральной разнице в  $\Delta\lambda = 211$  нм не было обнаружено значительного изменения в значениях коэффициентов связи, это позволяет предположить, что и в области «реальной» накачки иттербия  $\lambda_p \sim 980$  нм ( $\Delta\lambda = 1089 - 980 = 108$  нм) значения коэффициентов связи не будут менять свои значения.

Таким образом, применение предлагаемого расчетно-экспериментального метода для определения коэффициентов связи между волокнами системы (1+1)GTWave позволяет определить значения данных коэффициентов для оптического излучения из области типичной накачки (975 нм,

915 нм), несмотря на то, что измерения производятся в спектральном диапазоне длин волн малого поглощения активной области.

#### Заключение

В работе предложен расчетно-экспериментальный метод определения коэффициентов связи между волокнами, расположенными во внутренней оболочке системы (1+1)GTWave. Все рассуждения производятся в рамках упрощенной физико-математической модели распределения излучения накачки [5, 6]. Из аналитических решений дифференциальных уравнений данной модели при модернизации граничных условий были получены выражения, позволяющие определить значения коэффициентов связи при наличии необходимого набора экспериментальных данных. Во второй части работы приводятся результаты экспериментов, значения коэффициентов связи, определенных указанным методом, а также анализ полученных результатов. Предложенный метод позволяет экспериментально установить значения коэффициентов связи для дальнейшего использования их при численном проектировании волоконных лазеров/усилителей, в качестве активного элемента которых выступают (1+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. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. 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.

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., An Y., Guo Sh., Pan Zh., Leng J., Chen J., Xu X., A kilowatt all-fiber cascaded

amplifier // IEEE Photonics Technology Letters. 2015. Vol. 27, № 16. P. 1683.

9. An Y., Cao J., Huang Zh., Guo Sh., Xu X., Chen J., High-power all-fiberized superfluorescent source with distributed side-coupled cladding-pumped fiber // Appl. Opt. 2014. Vol. 53, № 36. P. 8564.

Статья поступила в редакцию 02.02.2018