

Распределение излучения накачки в лазерных волоконных световодах с многоэлементной первой оболочкой

М.А.Мелькумов, И.А.Буфетов, М.М.Бубнов, А.В.Шубин, С.Л.Семенов, Е.М.Дианов

Экспериментально исследован процесс передачи излучения накачки в лазерных волоконных световодах с многоэлементной первой оболочкой. Предложена модель для приближенной оценки такого процесса, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными. На лазерном световоде с трехэлементной первой оболочкой реализован полностью волоконный непрерывный одномодовый иттербиевый лазер с выходной мощностью 100 Вт.

Ключевые слова: волоконный лазер, световод с двойной оболочкой, иттербий.

1. Введение

За последние годы мощность одномодовых волоконных лазеров выросла более чем в 10 раз – со 110 Вт в 1999 г. [1] до 1.4 кВт в 2005 г. [2]. Сопоставимые уровни мощности (~300 Вт) были получены в лазерах с одной поляризацией излучения [3] и в одночастотных лазерах [4]. Достигнутые успехи обусловлены, главным образом, развитием систем диодной накачки, а также усовершенствованием характеристик лазерных световодов с большим диаметром поля моды. Кроме того, в увеличении мощности одномодовых волоконных лазеров важную роль играют новые схемы ввода излучения накачки.

В настоящее время в наиболее мощных волоконных одномодовых лазерных системах используются следующие схемы ввода излучения накачки.

1. Непосредственный ввод излучения накачки через торец волоконного световода с двойной оболочкой. При этом второй торец световода служит для вывода лазерного излучения [5]. Возможен также ввод излучения через оба торца лазерного световода с двойной оболочкой [6], что позволяет вдвое увеличить мощность вводимого излучения и получить более высокую мощность лазера. Однако использование обоих торцов лазерного световода для ввода излучения накачки требует применения в конструкции лазера неволоконных элементов – линз и многослойных диэлектрических зеркал, что существенно усложняет эксплуатацию устройства и снижает его надежность.

2. Ввод излучения накачки через торцы световода с использованием многомодовых объединителей [7–9]. Такие устройства имеют несколько многомодовых входов и один многомодовый выход с большей апертурой и большим диаметром, чем у входных световодов, и представляют собой несколько световодов, сваренных или сплавленных в один. Коммерчески доступные устройства обладают низкими потерями, однако не позволяют опе-

рировать большими мощностями (ограничение около 20 Вт на каждый вход) и существенно (до двух и более раз) снижают яркость излучения.

3. Ввод излучения накачки с использованием световода с двойной оболочкой, в котором, в отличие от способа ввода 1, первая оболочка состоит из нескольких отдельных световодов (см. рис.1), находящихся в оптическом контакте друг с другом [10]. Это световоды с многоэлементной первой оболочкой – МПО-световоды [11]. (В англоязычных публикациях они обычно называются GTWave-световодами [11].)

Кроме того, в некоторых случаях возможно использование комбинации второго и третьего способов ввода.

На сегодняшний день максимальные уровни выходной мощности достигнуты в волоконных лазерах с вводом накачки по схеме 1 [2]. Тем не менее, по всей вероятности, чисто волоконные схемы ввода 2 и 3 более перспективны для большинства применений, поскольку, в отличие от линзовых, они не требуют юстировки, значительно более устойчивы к внешним воздействиям (особенно к вибрациям и колебаниям температуры) и потенциально более долговечны.

Схемы лазеров на МПО-световодах привлекательны еще и тем, что позволяют внешне сравнительно просто в несколько раз увеличивать введенную в лазерный световод мощность накачки путем увеличения числа каскадов накачки (см. далее). Однако при этом возникают противоречивые требования к длине активного световода. С одной стороны, между двумя последовательными точками ввода излучения накачки длина лазерного световода должна быть достаточно велика для практически полного поглощения излучения накачки активными ионами. С другой стороны, общая длина лазера должна быть как можно меньше с целью увеличения порога различных нелинейных эффектов (ВКР, ВРМБ и т. д.), ограничивающих выходную мощность лазера (для этого же увеличивают диаметр поля моды в лазерных световодах). Чтобы уменьшить длину поглощения излучения накачки из первой оболочки, в сердцевине лазерного световода увеличивают число поглощающих накачку ионов на единицу длины (насколько это позволяют технология и условия формирования волноводной структуры в световоде). Однако повышение коэффициента поглощения накачки из

М.А.Мелькумов, И.А.Буфетов, М.М.Бубнов, А.В.Шубин, С.Л.Семенов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: melkoumov@fo.gpi.ru, iabuf@fo.gpi.ru

первой оболочки в МПО-световодах целесообразно только тогда, когда длина, на которой выравниваются плотности мощности излучения накачки в отдельных световодах МПО, мала по сравнению с длиной поглощения накачки.

Хотя в последнее время появился ряд публикаций по волоконным системам на основе световодов с многоэлементной первой оболочкой [10–12, 15], до настоящего времени вопросы передачи излучения накачки между отдельными компонентами МПО-световодов не рассматривались.

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование свойств МПО-световодов с двухэлементной первой оболочкой, изготовленных в НЦВО РАН, а также предложена модель для описания передачи мощности между элементами в подобной структуре. На примере конструкции непрерывного иттербиевого волоконного лазера с выходной мощностью 100 Вт продемонстрированы возможности наращивания мощности лазеров на МПО-световодах и возникающие при этом проблемы.

2. Масштабирование выходной мощности лазеров на МПО-световодах

МПО-световод представляет собой структуру, состоящую из одномодового активного волоконного световода, находящегося в оптическом контакте с одним или более параллельными многомодовыми световодами. При этом все световоды такой структуры окружены общей полимерной оболочкой с показателем преломления ниже показателя преломления плавленного кварца, на основе которого они все изготовлены (рис.1). Активный световод имеет сердцевину, легированную ионами редкоземельных элементов; остальные такой сердцевины не имеют и полностью состоят из плавленного кварца (пассивные световоды). Пассивные многомодовые световоды, в которые вводится излучение накачки, по всей длине находятся в оптическом контакте с активным световодом для передачи в него излучения накачки. Все отдельные пассивные световоды оптически связаны друг с другом и фактически представляют собой первую оболочку для сердцевины активного световода.

Существенным преимуществом МПО-световодов по сравнению с обычными световодами с двойной оболочкой является изначально асимметричная геометрия поперечного сечения (см. рис.1). Это приводит к тому, что, в отличие от обычных световодов с двойной оболочкой, в

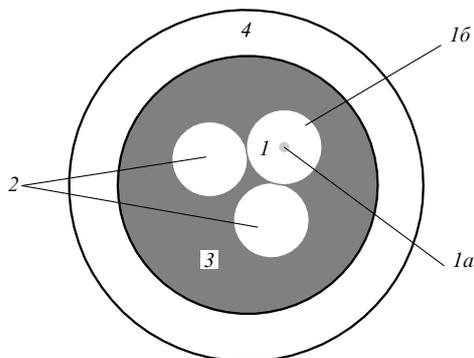


Рис.1. Схема поперечного сечения трехэлементного МПО-световода: 1 – сигнальный активный световод (1a – сердцевина, 1б – первая оболочка); 2 – пассивные световоды; 3 – общая оболочка с низким показателем преломления; 4 – защитная оболочка.

которых, как правило, приходится использовать нецилиндрическую (квадратную, прямоугольную, шестигранную, D-образную и т.п.) форму поперечного сечения первой оболочки для обеспечения эффективного поглощения сердцевинной излучения всех мод лазера накачки [13, 14], в МПО-световодах поперечное сечение активного и пассивного световодов может иметь круглую форму. Это существенно упрощает процесс сварки световодов и позволяет снизить потери в точках сварки активного световода с другими одномодовыми световодами.

Поскольку различные многомодовые световоды МПО-световода механически не связаны между собой (только общей полимерной оболочкой), то при необходимости их можно отделить друг от друга и независимо соединить пассивные световоды с источниками излучения накачки, а активные – с одномодовыми световодами для ввода и вывода сигнального излучения. Строение МПО-световодов позволяет сравнительно просто собирать чисто волоконные конструкции как лазеров, приваривая к выходам активного световода отрезки одномодовых световодов с волоконными брэгговскими решетками (ВБР) показателя преломления, так и волоконных усилителей, обеспечивая удобный доступ к обоим выходам усиливающего световода. Волоконные схемы, собранные на световодах такого типа, могут иметь несколько точек ввода накачки, что позволяет суммировать мощности накачки, введенные в различных точках, и использовать их для конструирования волоконных лазеров с высокой выходной мощностью.

В работе [10] был реализован 50-ваттный одномодовый лазер на трехэлементном световоде такого типа. Для увеличения выходной мощности лазера (до 100 Вт) мы использовали две схемы накачки 50-ваттного лазера, соединенные последовательно, чтобы вдвое повысить введенную мощность (рис.2). В результате число точек ввода излучения накачки увеличилось вдвое (восемь против четырех).

Для создания такой схемы накачки в середине отрезка трехэлементного МПО-световода было удалено поли-

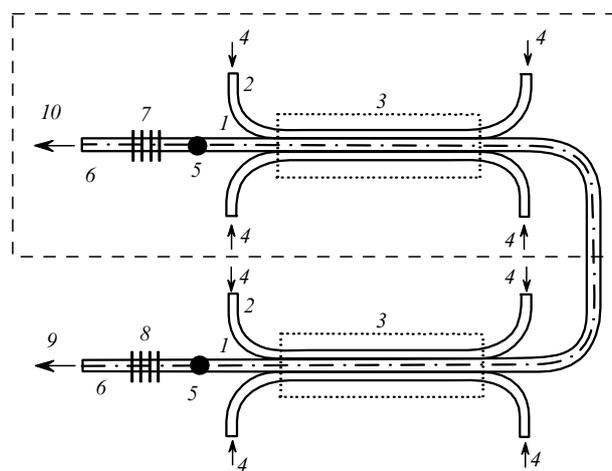


Рис.2. Схема 100-ваттного лазера на трехэлементном МПО-световоде (штриховой линией выделена схема 50-ваттного лазера [10]): 1 – активный световод; 2 – пассивные световоды; 3 – полимерная оболочка с низким показателем преломления; 4 – излучение накачки; 5 – точки сварки сигнального световода со световодами 6, на которых записаны БР; 7 – высокоотражающая БР; 8 – БР на выходном конце лазера с коэффициентом отражения $\approx 5\%$; 9 – излучение на выходе лазера; 10 – излучение лазера, проходящее сквозь высокоотражающую БР.

мерное покрытие и образованы разрывы пассивных световодов. При этом активный световод остался целым, а резонатор по-прежнему был образован парой ВБР, присоединенных к его концам. Длина каждой из двух получившихся частей лазера была выбрана такой, чтобы поглощение накачки в них составляло не менее 10 дБ. При этом учитывалось, что ширина линии излучения накачки лазерных диодов сравнима с шириной пика поглощения, а максимум спектра излучения накачки смещается по длине волны в зависимости от мощности.

Накачка осуществлялась восемью блоками лазерных диодов (МИЛОН-лазер, Санкт-Петербург) с предельной выходной мощностью 20 Вт каждый и длиной волны максимума излучения, меняющейся в пределах 963–978 нм в зависимости от выходной мощности, что было вызвано отсутствием термостабилизации прибора.

Резонатор лазера состоял из двух ВБР с коэффициентами отражения $\sim 100\%$ (для глухой решетки) и около 5% (для выходной решетки). Волоконные решетки были записаны в сердцевине световода с длиной волны отсечки основной моды вблизи 1 мкм. Максимум отражения ВБР находился на длине волны 1.068 мкм. Сердцевина активного световода состояла из фосфоросиликатного стекла [15], легированного ионами Yb^{3+} с весовой концентрацией $\sim 2\%$. Полная длина активного световода составляла 44 м (2×22 м).

На рис.3 представлена зависимость выходной мощности лазерной генерации от введенной мощности излучения накачки. Для создания 100-ваттного лазера был изготовлен трехэлементный МПО-световод с параметрами, существенно отличающимися от параметров световода, использовавшегося в лазере мощностью 50 Вт [10]. Диаметр поля моды излучения генерации в активном световоде был увеличен до 14.5 мкм (вместо 8 мкм ранее), коэффициент поглощения α_{clad} из первой оболочки на длине волны 975 нм возрос до 1.7 дБ/м (0.9 дБ/м в [10]). Это позволило сократить длину поглощения излучения накачки и уменьшить необходимую длину лазерного световода.

В результате изменений в конструкции лазера пороговая мощность возникновения таких нелинейных эффектов, как ВКР и ВРМБ, оказалась выше максимальной мощности лазера, что подтверждается линейной зависимостью выходной мощности от мощности накачки на рис.3. Кроме того, увеличение диаметра поля основной моды позволило существенно снизить потери мощности вследствие уширения спектра генерации за счет четырехфотонного смешения.

При масштабировании выходной мощности лазера

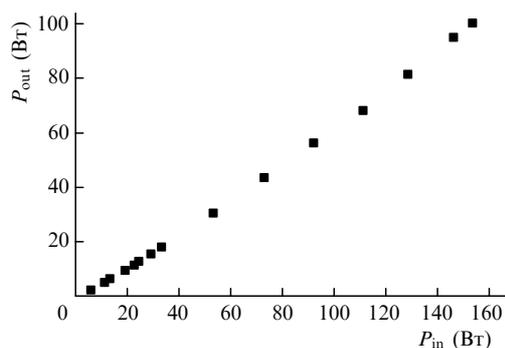


Рис.3. Зависимость выходной мощности излучения лазерной генерации P_{out} от введенной мощности накачки P_{in} .

до еще больших значений с целью подавления нелинейных эффектов необходимо наряду с другими мерами и дальше сокращать длину поглощения излучения накачки в МПО-световоде. Однако существует еще один фактор, который может ограничивать уменьшение длины лазерного световода и тем самым максимально достижимую выходную мощность волоконного лазера, — это эффективность передачи излучения накачки между отдельными элементами такого световода.

Для описания эффективности передачи обычно используют понятия *коэффициента связи или длины связи* [17]. В настоящей работе под длиной связи L_c мы будем понимать такую длину МПО-световода, на которой интенсивности в активном и пассивном световодах становятся практически равными при вводе излучения лишь в один из них. Следует отметить, что малая длина связи необходима не только для того, чтобы обеспечить быстрый переход излучения накачки из пассивного световода в активный, но и для эффективного перераспределения энергии между лучами, пересекающимися и не пересекающимися сердцевину активного световода. Последнее необходимо для поглощения в сердцевине мощности всех лучей, распространяющихся по первой оболочке, включая те, которые изначально не пересекали сердцевину.

3. Модель для расчета длины связи в МПО-световодах

Для описания передачи излучения между близко расположенными волноводами часто используется волновой анализ мод оптически связанных волноводов [16, 17]. Это удобно в случае волноводов с не слишком большим числом направляемых мод. Многомодовые световоды с диаметром первой оболочки $D_{\text{inn}} = 80 - 300$ мкм и числовой апертурой $\text{NA} = 0.2 - 0.4$ имеют очень большое число мод, в связи с чем их модовое описание представляется весьма сложным. В то же время хорошо известно [17], что в этом случае вполне применимо лучевое приближение, которое и будет использоваться ниже для описания процесса передачи мощности из одного элемента МПО-световода в другой.

На рис.4 показано поперечное сечение двухэлементного МПО-световода. Для простоты здесь и далее будем считать, что диаметры пассивного (I) и активного (II) световодов равны между собой. Минимальное расстояние между границами световодов обозначено d (для общности считаем, что элементы МПО-структуры не касаются друг друга, что может быть обусловлено несовершенством технологии производства таких световодов). Плоскость, в которой лежат оси обоих световодов, обозначим τ .

Хорошо известно, что в световодах, подобных представленным на рис.4, могут распространяться как меридиональные, так и не меридиональные (косые) лучи. Направляемыми будут те лучи [17], которые распространяются под углами к оси световода, меньшими критического угла ϕ_c ; этот угол определяет условие полного внутреннего отражения на границе кварцевое стекло — полимер.

Очевидно, что обмен энергией между пассивным и активным световодами эффективен не только в случае их соприкосновения, но и при нарушении полного внутреннего отражения в области с малой (порядка длины волны) толщиной прослойки полимера. При этом каждый из лу-

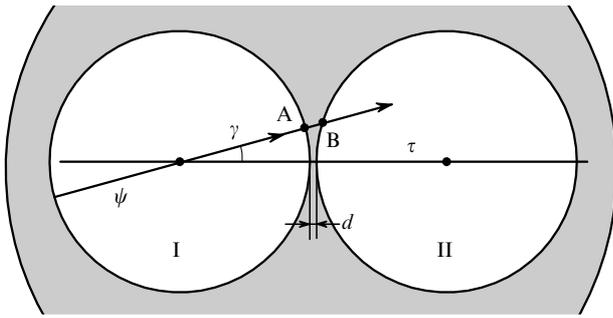


Рис.4. Схема передачи излучения в двухэлементном МПО-световоде для меридиональных лучей.

чей, распространяющихся в световоде I по определенной траектории, будет иметь свой собственный коэффициент передачи мощности в световод II. Для того чтобы рассчитать передачу мощности из одного световода в другой, необходимо найти коэффициенты передачи каждого из лучей и просуммировать их по всем лучам. Следовательно, основной задачей является нахождение коэффициента прохождения каждого из лучей из световода I в световод II.

В данной работе для простоты мы полагаем, что передача энергии в МПО-световоде осуществляется только меридиональными лучами. Использование в расчетах только этих лучей объясняется тем, что для них границы раздела можно считать плоскопараллельными. На рис.4 плоскость падения ψ одного из меридиональных лучей на границу раздела сердцевина – оболочка наклонена относительно плоскости τ на угол γ и проходит через ось световода I. Все меридиональные лучи лежат в плоскостях, подобных ψ , с различными углами наклона γ относительно плоскости τ . Линии пересечения плоскости ψ и поверхностей световодов являются прямыми. На рис.4 проекции этих прямых на плоскость рисунка обозначены буквами А и В. Очевидно, что прямые, образованные пересечением плоскости ψ с поверхностями световодов I и II, параллельны между собой. Если пренебречь кривизной границы раздела кварц – полимерная оболочка (что может быть оправданно для малых ($\gamma < 10^\circ$) углов наклона), то для меридиональных лучей задача прохождения через область с низким показателем преломления (оболочку) может быть приближенно заменена задачей о нарушении полного внутреннего отражения для лучей, проходящих через плоский слой толщиной АВ. Следует отметить, что при диаметрах пассивного и активного световодов ~ 100 мкм и более меридиональные лучи, лежащие в плоскостях типа ψ с углами $\gamma > 10^\circ$, из-за слишком большого расстояния АВ не будут давать сколько-нибудь существенного вклада в передачу энергии излучения с длиной волны $\lambda \sim 1$ мкм из световода I в световод II даже при $d = 0$.

В работе [18] с использованием волнового подхода и уравнения Максвелла были впервые получены коэффициенты прохождения света с ТЕ- и ТМ-поляризациями при нарушении полного внутреннего отражения в случае плоскопараллельных границ раздела между средами для слоя произвольной толщины. Позднее (см. напр., [19]) те же соотношения были получены с помощью квантовомеханических представлений.

Соотношения для коэффициента прохождения волны Т с ТЕ- (вектор \mathbf{E} перпендикулярен плоскости падения) и ТМ-поляризациями имеют следующий вид [18]:

$$T_{TE} = \frac{4 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - n_1^2)}{(1 - n_1^2)^2 \sinh^2 u + 4 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - n_1^2)},$$

$$T_{TM} =$$

$$= \frac{4n_1^4 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - n_1^2)}{(1 - n_1^2)^2 (\sin^2 \theta - n_1^2 \cos^2 \theta) \sinh^2 u + 4n_1^4 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - n_1^2)},$$

где

$$u = \frac{2\pi h}{n_1 \lambda} \sqrt{\sin^2 \theta - n_1^2};$$

θ – угол падения; n_1 – отношение показателей преломления сред с меньшим и большим показателями преломления; λ – длина волны; h – толщина слоя с низким показателем преломления.

Если для меридиональных лучей в МПО-световоде использовать приближение плоской границы раздела, то коэффициент прохождения меридиональных лучей с ТЕ- и ТМ-поляризациями можно найти с помощью соотношений (1). В этом случае угол θ будет углом между направлением распространения луча и нормалью к поверхности световода в точке падения. Для всех меридиональных лучей угол θ лежит в плоскостях, подобных плоскости ψ . Чтобы упростить запись, введем также угол $\phi = 90^\circ - \theta$ (угол между осью световода и направлением распространения луча). Величина h будет равна расстоянию АВ, которое в случае $\gamma < 10^\circ$ с хорошей точностью есть

$$h(\gamma) = AB(\gamma) = 2R(1 - \cos \gamma) + d,$$

где R – радиус элемента в структуре МПО-световода.

Если предположить, что диапазон углов γ , в котором наблюдается сколько-нибудь существенная передача мощности, достаточно мал, то можно приближенно считать (еще одно приближение), что меридиональные лучи при переходе из одного световода в другой остаются меридиональными. Тогда можно рассматривать распространение меридиональных лучей с различными заданными углами ϕ независимо друг от друга. Граничные интенсивности $I_b(\phi)$ меридиональных лучей, распространяющихся с заданным углом ϕ , должны становиться равными из-за обмена энергией между световодами I и II по мере распространения этих лучей вдоль МПО-световода. В случае равномерного распределения мощности меридиональных лучей, распространяющихся под углом ϕ по азимуту, существует однозначное соотношение между их интенсивностью на границе световодов и полной мощностью $P(\phi)$ излучения. Исходя из этого обмен излучением между световодами I и II в двухэлементном МПО-световоде может быть описан системой дифференциальных уравнений для мощностей $P_I(\phi, z)$ и $P_{II}(\phi, z)$ меридиональных лучей в каждом из этих световодов:

$$\frac{dP_I(\phi, z)}{dz} = k(\phi)P_{II}(\phi, z) - k(\phi)P_I(\phi, z),$$

$$\frac{dP_{II}(\phi, z)}{dz} = k(\phi)P_I(\phi, z) - k(\phi)P_{II}(\phi, z),$$

где

$$k(\phi) = \frac{\tan \phi}{4\pi R} \int_{\gamma} T(\phi, \gamma) d\gamma$$

– коэффициент связи, характеризующий обмен мощностью между лучами, идущими под углом ϕ к оси в световодах I и II; $T(\phi, \gamma)$ – коэффициент прохождения луча с углом распространения ϕ в зависимости от угла γ (для нахождения $T(\phi, \gamma)$ используются соотношения (1) и (2)).

Дополнив систему уравнений (3) начальными условиями, можно получить решения в виде зависимостей мощности лучей, распространяющихся под определенным углом к оси в световодах I и II, от координаты z . Чтобы получить зависимость полной мощности излучения, распространяющегося по световодам I и II, от координаты, необходимо проинтегрировать полученные решения по всем возможным углам ϕ и провести вычисления для обеих поляризацій. При этом необходимо учесть, что начальные условия для лучей, идущих под различными углами ϕ , будут различными и, вообще говоря, будут зависеть от условий возбуждения. В представленных ниже результатах расчетов для нахождения начальных условий использовались экспериментально измеренные зависимости распределения интенсивности излучения в дальнем поле.

Выражения (2)–(4) и легко обобщить на случай световодов I и II разного диаметра. Кроме того, систему уравнений (3) можно преобразовать для расчетов МПО-световодов с числом элементов в первой оболочке более двух.

Следует отметить, что в общем случае длина поглощения излучения накачки из первой оболочки МПО-световода (L_1) всегда больше, чем такая же длина в обычном световоде с двойной оболочкой (L_0) с такими же диаметром сердцевины и площадью первой оболочки ($L_1 > L_0$). Если во второе уравнение системы (3) ввести слагаемое α_{clad} , ответственное за поглощение излучения накачки в активном световоде (при отсутствии пассивного), то нетрудно показать, что длина поглощения в МПО-световоде по сравнению с обычным световодом увеличится незначительно, если коэффициент связи будет много больше четверти коэффициента поглощения из активного световода ($k(\phi) \gg \alpha_{\text{clad}}/4$), или, что то же самое, если длина связи будет много меньше длины поглощения ($L_c \ll L_0$). Таким образом, скорость перекачки излучения между элементами МПО-структуры накладывает ограничение на рост коэффициента поглощения накачки из пассивного световода и, тем самым, на уменьшение длины лазера. В поглощающем МПО-световоде это будет приводить к изменению поглощения и эффективности передачи по длине, поскольку лучи, идущие под меньшими углами, будут хуже поглощаться.

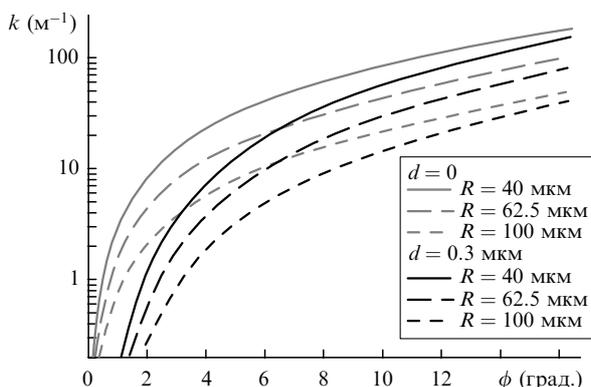


Рис.5. Расчетные зависимости коэффициента связи k от угла ϕ для МПО-световодов с различными значениями d и R .

На рис.5 представлены расчетные зависимости коэффициента связи k от угла ϕ для МПО-световодов с различными параметрами. Видно, что коэффициент k уменьшается с увеличением d и R , причем особенно быстро – при малых углах распространения. Кривые на рис.5 позволяют оценить, как будет меняться поглощение лучей в световоде в зависимости от их угла распространения ϕ и параметров МПО-световода.

Несмотря на то что приведенные выше рассуждения относятся только к меридиональным лучам, такой подход, по-видимому, может быть использован и для качественного описания передачи энергии всеми направляемыми лучами.

4. Экспериментальное измерение длины связи в двухэлементных МПО-световодах

В экспериментах использовались двухэлементные МПО-световоды с диаметрами каждого из элементов первой оболочки ($n = 1.45$) $D_{\text{clad}} = 115 - 140$ мкм (в зависимости от образца). Отражающая полимерная оболочка имела показатель преломления $n = 1.39$, что обеспечивало числовую апертуру для излучения в первой оболочке $NA \approx 0.4$.

Возбуждение МПО-световодов осуществлялось источником накачки на одиночных лазерных диодах с длиной волны ~ 1 мкм и расходимостью менее 0.4 рад. Излучение вводилось только в световод I (см. рис.4), а мощность на выходе и угловое распределение интенсивности в дальнем поле измерялись для обоих световодов. Длины отрезков измеряемых световодов варьировались в пределах 3–320 см. Для устранения влияния поглощения излучения в сердцевине активного световода на результаты измерений, в экспериментах использовалось излучение длин волн, не попадающих в полосы поглощения активных ионов.

Все измерения проводились на свободно лежащих световодах с радиусами изгибов не менее 10 см. При меньших радиусах кривизны или же в случае приложения к световодам внешних воздействий (сжатия, растяжения, кручения и т. д.) мощность, передаваемая от одного элемента первой оболочки МПО-световодов к другому, могла существенно увеличиваться (на отрезках до 10 см) или уменьшаться (по-видимому, из-за изменения условий контакта между световодами).

На рис.6 представлены экспериментальные зависимости угловых распределений интенсивности излучения из световодов I и II в дальнем поле для нескольких длин МПО-световода. Результаты относятся к одному образцу МПО-световода с диаметром каждого из элементов $D_{\text{clad}} = 115$ мкм и получены последовательным уменьшением его длины. Хорошо видно, что мощность излучения, распространяющегося под большими углами, выравнивается в световодах I и II значительно быстрее, чем мощность излучения, распространяющегося под малыми углами. Так, мощность излучения, распространяющегося под углами свыше 14° , выравнивается уже на расстоянии 6 см, при этом провал в центре, соответствующий низкоапертурным лучам, сохраняется на значительно больших расстояниях.

На рис.7 представлены зависимости отношения мощности на выходе световода II к полной мощности для лучей, распространяющихся под определенными углами, от длины МПО-световода. Как видно из рис.7, экспериментальные данные и расчетные кривые для двухэлемент-

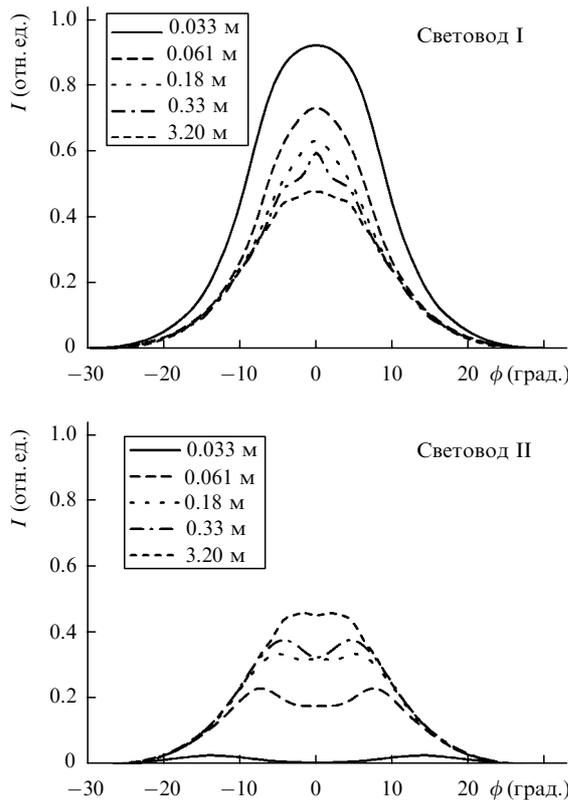


Рис.6. Экспериментально измеренные угловые распределения интенсивности излучения в дальнем поле на выходе из световодов I и II для различных длин МПО-световода.

ного световода с $D_{\text{clad}} = 115$ мкм при заданном $d = 0.3$ мкм неплохо совпадают друг с другом за исключением результатов, полученных для короткого отрезка световода (33 мм) и угла $\phi = 2^\circ$. Различие результатов расчета и эксперимента для световода длиной 33 мм наблюдалось не во всех световодах и изменялось от образца к образцу. В некоторых образцах эти различия наблюдались на длине до 100 мм, а в отдельных случаях и более. Возможно, такое несоответствие связано с тем, что расстояние d между элементами первой оболочки изменяется по длине каждого световода и от образца к образцу. Однако исходя из того, что в большинстве образцов указанные различия наблюдались на небольших длинах (менее 100 мм), можно заключить, что эти неоднородности проявляются на ограниченной длине (до нескольких санти-

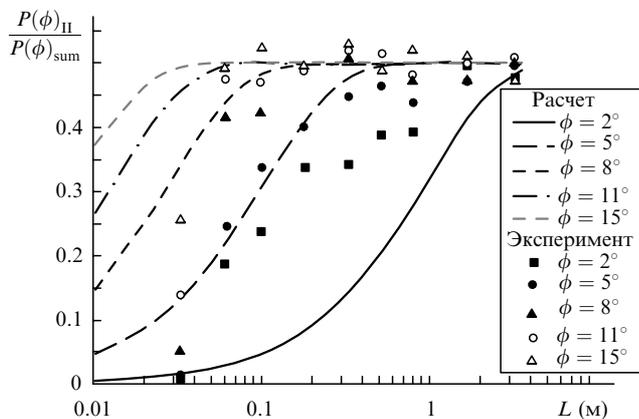


Рис.7. Расчетные (для $d = 0.3$ мкм) и экспериментальные зависимости отношения мощности излучения в световоде II к полной мощности от длины МПО-световода при различных углах ϕ .

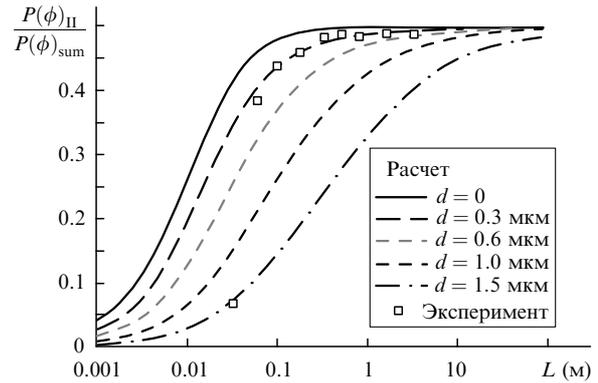


Рис.8. Расчетные и экспериментальные зависимости отношения интегральной по всем углам мощности в световоде II к полной мощности излучения от длины МПО-световода при различных расстояниях d между световодами.

метров) и не влияют на передачу мощности в достаточно длинных (более 1 м) световодах. Существенное различие между экспериментальными и расчетными данными для лучей, распространяющихся под углом $\phi = 2^\circ$, связано, по-видимому, с тем, что в расчетах учитываются только меридиональные лучи, а это может существенно занижать эффективность передачи мощности между световодами при малых углах ϕ и ненулевых значениях зазора d .

На рис.8 показаны зависимости отношения интегральной по всем углам выходной мощности световода II к полной введенной в световод мощности излучения для тех же отрезков МПО-световода, данные для которых приведены на рис.6 и 7. Расчет проводился для пяти значений параметра d . Как и на рис.7, существенное различие в эффективностях перекачки наблюдается только на длине световода 33 мм. Согласно рис.8, для световода этой длины некое усредненное расстояние между элементами первой оболочки составляет 1.5 мкм, а для остальных отрезков световодов, как и в предыдущем случае, наилучшее согласие с экспериментом достигается при $d = 0.3$ мкм. Как следует из рис.8, при больших расстояниях d (порядка микрона и более) длина связи может превысить 10 м, поэтому такие световоды будет сложно использовать для создания волоконных лазеров и усилителей из-за существенного уменьшения поглощения накачки из первой оболочки.

Согласно рис.8, в данном образце МПО-световода длина связи $L_c \approx 30$ см; такие же значения L_c были получены для большинства исследованных образцов двухэлементных МПО-световодов. Таким образом, можно утверждать, что для описанного выше 100-ваттного лазера с эффективной длиной поглощения накачки 22 м условие $L_c \ll L_0$ выполняется с большим запасом.

Необходимо отметить, что параметр $d = 0.3$ мкм, полученный в результате сопоставления экспериментальных и расчетных данных, может не соответствовать реальному зазору. Отличие от нуля указывает на то, что зазор между элементами в МПО-световоде существует и может изменяться по длине световода. Такой подход позволяет качественно моделировать процесс перекачки между элементами в МПО-световодах и оценивать, как изменяется эффективность перекачки при изменении различных параметров. Нам не удалось прямым методом экспериментально измерить значение d в наших МПО-световодах из-за малости этого параметра и трудностей измерения через двойную полимерную оболочку.

В использованной выше модели был сделан ряд существенных допущений, позволяющих упростить расчет передачи мощности между элементами в МПО-световоде. Тем не менее наблюдаемое согласие между экспериментальными данными и результатами расчетов свидетельствует в пользу того, что сделанные допущения являются разумными, а предложенная модель может быть использована для качественного описания процесса передачи излучения между элементами в МПО-световоде.

5. Заключение

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы. Выравнивание мощности в световодах I и II идет по существенно неэкспоненциальному закону и зависит от апертуры распространяющегося излучения. Мощность излучения, распространяющегося по МПО-световоду под меньшими углами, выравнивается между элементами структуры медленнее, чем мощность излучения, идущего под большими углами. Таким образом, для более эффективной передачи излучения между световодами I и II желательнее максимальное заполнение апертуры МПО-световода. В большинстве исследованных двухэлементных МПО-световодов в случае возбуждения всей числовой апертуры световода (0.4) длина, на которой мощности в световодах выравниваются, в пределах ошибки измерений ($\sim 5\%$) составляет около 30 см.

Предложенная для описания процесса передачи излучения между элементами МПО-световода модель позволяет приближенно рассчитывать эффективность перекачки в зависимости от различных параметров. Результаты расчетов находятся в качественном согласии с экспериментальными данными. Наблюдаемое на некоторых отрезках МПО-световодов небольшой длины (до 10 см) существенное различие между данными эксперимента и расчетов, возможно, объясняется изменением зазора между элементами в МПО-световоде. При этом в большинстве образцов эти вариации носят локальный характер и практически не влияют на передачу мощности между световодами I и II в МПО-световодах большой длины (~ 1 м и больше). Наличие таких участков объясняется, по-видимому, технологическими причинами.

На основе трехэлементного МПО-световода был создан полностью волоконный непрерывный одномодовый иттербиевый лазер с выходной мощностью 100 Вт. По-

казано, что для данного лазера конечная длина перекачки в МПО-световоде не является ограничивающим фактором. Реализованная в лазере схема накачки демонстрирует возможности увеличения выходной мощности волоконных лазеров и показывает, что световоды с многоэлементной первой оболочкой являются перспективными с точки зрения применения в мощных волоконных лазерах и усилителях.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.Н.Гурьянову, М.В.Яшкову (ИХВВ РАН) и О.И.Медведкову (НЦВО) за помощь в проведении экспериментов и ценные консультации, а также К.С.Кравцову (НЦВО) за полезные обсуждения.

1. Dominic V., MacCormack S., Waarts R., et al. *Electron. Lett.*, **35**, 1158 (1999).
2. Nilsson J., Sahu J.K., Jeong Y., et al. *Proc. OFC'2005* (Anaheim, CA, 2005, OTuF1).
3. Machewirth D., Khitrov V., Samson B., et al. *Proc. OFC'2005* (Anaheim, CA, 2005, OTuF2).
4. Jeong Y., Nilsson J., Sahu J.K., et al. *Opt. Lett.*, **30** (5), 459 (2005).
5. Snitzer E., Po H., Hakimi F., et al. *Proc. Conf. Optical Fiber Sensors* (New Orleans, LA, 1988, PD5).
6. Muendel M., Engstrom B., Kea D., et al. *Proc. CLEO'97* (OSA, Washington, DC, 1997, CPD30).
7. Hakimi F., Hakimi H. *Proc. CLEO'2001* (Baltimore, MD, USA, 2001, CTUD2).
8. Kosterin A., Temyanko V., Fallahi M., Mansuripur M. *Proc. OFC'2005* (Anaheim, CA, 2005, OTuF6).
9. Karpov V.I., Dianov E.M., Kurkov A.S., et al. *Proc. OFC'99* (San Diego, CA, 1999, WM3-1).
10. Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А. и др. *Квантовая электроника*, **35** (4), 328 (2005).
11. Grudinin A.B., Turner P.W., Codemard C., et al. *Proc. ECOC'2002* (Copenhagen, Denmark, 2002, PD1.6).
12. Sahu J.K., Jeong Y., Algeria C., et al. *Proc. ASSP'2004* (New Mexico, 2004, invited).
13. Muendel M. *Proc. Conf. Lasers and Electro-optics* (OSA, Washington, DC, 1996, CTuU2).
14. Liu A., Ueda K. *Opt. Commun.*, **132**, 511 (1996).
15. Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Кравцов К.С. и др. *Квантовая электроника*, **34** (9), 843 (2004).
16. Унгер Х.Г. *Планарные и волоконные оптические волноводы* (М.: Мир, 1980).
17. Снайдер А., Лав Дж. *Теория оптических волноводов* (М.: Радио и связь, 1987).
18. Hall E. *Phys. Rev. (Ser. I)*, **15**, 73 (1902).
19. Lee B., Lee W. *J. Opt. Soc. Am. B*, **14** (4), 777 (1997).