

УДК 535: 621.373.8

Е.А. Злобина¹, Е.И. Донцова¹, С.И. Каблуков¹, С.А. Бабин^{1, 2}

¹ Институт автоматки и электрoметрии Сибирского отделения РАН,
г. Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ЧИСТКИ ПУЧКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВКР-ЛАЗЕРА НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНОГО СВЕТОВОДА С ПРЯМОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Выполнено моделирование эффекта чистки пучка при ВКР-преобразовании многомодового излучения накачки в градиентном волоконном световоде. Проведено сравнение параметров ВКР-лазера с многомодовой накачкой на основе градиентных световодов с диаметром сердцевины 62,5 и 85 мкм.

Ключевые слова: ВКР-лазер, диодная накачка, градиентный световод, чистка пучка.

E.A. Zlobina¹, E.I. Dontsova¹, S.I. Kablukov¹, S.A. Babin^{1, 2}

¹ Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

MODELING OF THE BEAM CLEANING EFFECT AND OPTIMIZATION OF THE RAMAN FIBER LASER BASED ON GRADED-INDEX FIBER WITH DIRECT DIODE PUMPING

In this paper the beam cleaning effect at Raman conversion of multimode pump radiation in a graded-index fiber is modeled, and the output parameters of Raman laser with multimode pumping based on graded-index fiber with core diameters of 62.5 and 85 μm are compared.

Keywords: Raman laser, diode pumping, graded-index multimode fiber, beam cleanup.

Введение

Развитие технологий изготовления мощных полупроводниковых источников с возможностью объединения их излучения в одном волоконном световоде открыло новые перспективы увеличения мощности и яркости диодной накачки волоконных световодов, позволяющие создавать новые, полностью волоконные лазерные конфигурации, получать и исследовать в них новые режимы генерации. Одним из актуальных направлений является исследование возможностей реализации эффективных волоконных схем генерации лазерного излучения без использования легированных редкоземельными элементами (РЗЭ: Yb, Er, Tm и др.) активных волокон, в частности за счет процесса вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в пассивных волоконных световодах [1]. Большой интерес представляет использование многомодовых лазерных диодов для прямой оптической накачки ВКР-лазеров. Эффективное ВКР-преобразование мощного, но низкокачественного излучения многомодовых диодов в лазерное излучение высокого качества в пассивном волоконном световоде с характеристиками, сравнимыми с наиболее эффективным на данный момент иттербиевым волоконным лазером (ИВЛ), позволит избежать характерной для иттербиевого лазера проблемы фотопотемнения, которое усиливается при уменьшении длины волны генерации [2]. При этом малый квантовый дефект в схеме ВКР-усиления уменьшит нагрев волокна.

В литературе обсуждается два возможных подхода к решению этой проблемы. В первом случае предлагается использовать накачку в оболочку, по аналогии с волоконными РЗЭ-лазерами [3]. Данный подход позволил получить до 100 Вт мощности на длине волны 1120 нм для ВКР-лазера на основе пассивного световода с двойной оболочкой, накачиваемого многомодовым ИВЛ с длиной волны 1064 нм с дифференциальной эффективностью 71 % [4]. Другой подход основан на использовании многомодовых градиентных (GRIN) световодов при накачке многомодовым излучением напрямую в их относительно большую сердцевину [5]. В результате был продемонстрирован волоконный ВКР-лазер на основе многомодового градиентного световода, генерирующий квазиодномодовое излучение с длиной волны 1116 нм при накачке многомодовым Nd:YAG лазером на 1064 нм. Эффект «чистки» пучка, т.е. селекции нижних поперечных мод за счет специфики эффекта ВКР в многомодовых градиентных световодах, был подробно исследо-

дован в работе [6], где продемонстрировано сложение многомодовых пучков накачки и их ВКР-преобразование в 3 раза более яркий пучок с эффективностью ~56 %. Тем не менее эксперименты с прямой диодной накачкой ВКР-лазера до последнего времени не проводились.

Недавно появились коммерчески доступные мощные многомодовые лазерные диоды (ЛД), генерирующие более 50 Вт выходной мощности в спектральных областях 980 и 930 нм. Этого может быть достаточно для прямой оптической накачки ВКР-лазеров. Предварительные эксперименты показали, что концепция ВКР-лазеров с прямой диодной накачкой реально осуществима – продемонстрирована генерация в области <1 мкм в многомодовом градиентном световоде с накачкой мощным лазерным диодом на 938 нм [7], которая трудно достижима для существующих волоконных лазеров, легированных редкоземельными элементами. Похожая схема, но с большей выходной длиной волны (1020 нм) при накачке на 976 нм была реализована в [8]. Этой же группой позднее была получена импульсная генерация на 835 нм [9].

Цель данной работы состояла в количественном описании эффекта чистки пучка и оптимизации схемы ВКР-лазера на основе градиентного световода с прямой диодной накачкой.

1. Эксперимент

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Для накачки использовался многомодовый лазерный диод (ЛД) JENOPTIKJOLD-75-FC-11 мощностью до 75 Вт на 938 нм с выходом в многомодовый световод с диаметром сердцевины 105 мкм. Температура диода стабилизировалась с помощью термоконтроллера (ТК) на элементе Пельтье. Выходной пучок лазера накачки коллимировался линзой Л1 и фокусировался линзой Л2 в сердцевину (диаметром 62,5 мкм) градиентного волоконного световода Corning 62.5/125 CPC7 GRIN длиной 4,5 км. Коэффициент заведения составил ~60 %, что соответствует уровню мощности многомодовой накачки 45 Вт непосредственно в пассивном световоде. Резонатор ВКР-лазера формировался прямым сколом выходного торца (с отражением ~4 %) и многомодовой волоконной брэгговской решеткой (ММВБР), записанной в сердцевине градиентного световода УФ-лазером [10], аналогично ММВБР, используемым в резонаторе многомодовых ИВЛ [11]. Выходной пучок ВКР-лазера коллимировался линзой Л3 и разделялся дихроичным зеркалом

(ДЗ) на проходящее излучение накачки (938 нм) и генерируемое стоксово излучение (980 нм). Три измерителя мощности (ИМ1, ИМ2, ИМ3) использовались для контроля мощности накачки и генерации в прямом и обратном направлении. Спектр излучения измерялся анализатором оптического спектра Yokogawa AQ6370 (OSA).

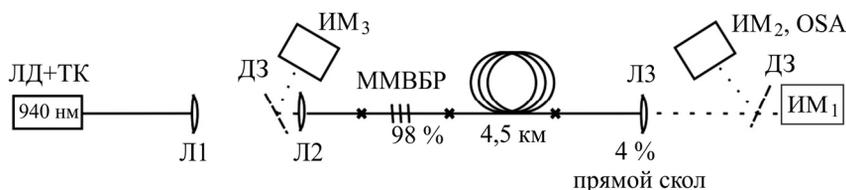


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Порог генерации в данной схеме составляет около 35 Вт. При превышении порога, в дополнение к широкому спектру накачки, центрированному на 938 нм, появляется узкий пик генерации вблизи 980 нм (рис. 2, а). Максимальная мощность генерации достигается при токе лазерного диода 10,2 А (соответствующем мощности накачки в сердцевице пассивного световода около 45 Вт) и составляет 2,3 Вт в прямом и 0,6 Вт в обратном направлении. При этом на максимальном токе становится заметным пик второй стоксовой компоненты на 1025 нм, выход в генерацию которой ограничивает рост мощности первой стоксовой компоненты на 938 нм. Это также свидетельствует о хорошем качестве пучка на 938 нм, что подтверждается измерением его профиля (рис. 2, б) – на фото видно, что генерируемое излучение (яркое пятно в центре) имеет на порядок меньшее сечение, чем излучение накачки (широкое пятно).

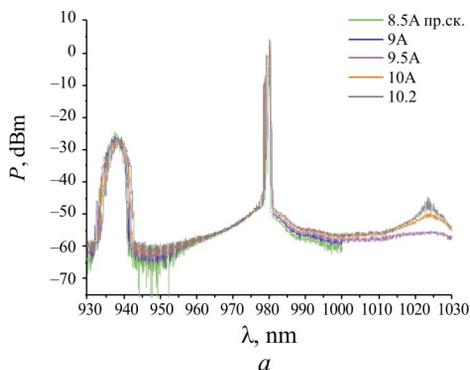


Рис. 2. Спектр выходного излучения в зависимости от тока ЛД (а) и профиль пучка при максимальной мощности (б)

Таким образом, предварительные эксперименты показали наличие сильного эффекта чистки пучка в исследованной схеме ВКР-лазера с многомодовой диодной накачкой, однако выходные характеристики такого лазера далеки от оптимума, что потребовало проведения расчетов, позволяющих описать эффект чистки пучка и провести дальнейшую оптимизацию схемы. Интерес представляет также переход на более короткую длину волны накачки (915 нм) с генерацией около 950 нм и сравнение характеристик градиентных световодов разного диаметра (62,5 и 85 мкм). Результаты выполненных расчетов приведены в следующих разделах.

2. Расчет интеграла перекрытия мод ступенчатого и градиентного световода

В эксперименте излучение диодной накачки заводится из ступенчатого световода с диаметром сердцевины $d_s = 105$ мкм и апертурой $NA_s = 0,15$ в градиентный световод с параметрами $d_g = 62,5$ мкм и $NA_g = 0,27$. Количество мод накачки на длине волны $\lambda = 915$ нм в ступенчатом световоде $V_s^2/2 = 1\,461$, в градиентном – $V_g^2/4 = 838$, где параметр $V_{s,g} = NA_{s,g} \pi d_{s,g} / \lambda$. Видно, что в градиентном световоде мод существенно меньше, поэтому необходимо знать, как моды ступенчатого световода переходят в моды градиентного.

Для примера рассчитаем коэффициент разложения мод ϵ ступенчатого световода по модам градиентного. Для заведения излучения из одного световода в другой в эксперименте используется система линз. Мы учитываем ее в расчете, уменьшив диаметр d_s до 52,5 мкм и увеличив апертуру NA_s до 0,3. При этом количество мод ступенчатого световода не изменится. Расчет коэффициента разложения проводился согласно алгоритму, представленному в работе [12]. Под модами будут пониматься линейно поляризованные моды LP_{lm} , где l – азимутальный и m – радиальный параметры. Поле моды в цилиндрических координатах зависит от радиальной координаты r и угла ϕ . В световоде со ступенчатым профилем показателя преломления оно рассчитывается следующим образом:

$$\psi_{lm}^s = J_l(rU_{lm}) \cos(l\phi), \quad (1)$$

где $J_l(rU_{lm})$ – функция Бесселя порядка l . Параметр U_{lm} находится из характеристического уравнения

$$U_{lm} \frac{J_{l+1}(U_{lm})}{J_l(U_{lm})} = W_{lm} \frac{K_{l+1}(W_{lm})}{K_l(W_{lm})}, \quad (2)$$

где $K_l(W_{lm})$ – модифицированная функция Бесселя порядка l ,
 $W_{lm} = \sqrt{V_s^2 - U_{lm}^2}$.

Поле моды в градиентном световоде рассчитывается по формуле [12, 13]

$$\Psi_{lm}^s = (R\sqrt{V_g})^l \exp(-V_g R^2 / 2) L_{m-1}^l(V_g R^2) \cos(l\varphi), \quad (3)$$

где $L_{m-1}^l(V_g R^2)$ – обобщенный полином Лагерра, $R = r / a_g$; a_g – радиус сердцевины световода. Стоит отметить, что моды градиентного световода LP_{lm} можно расположить по группам. При этом в каждой группе с индексом $N = 2m - l - 1$ константа распространения мод практически одинакова. Однако, как показано в работе [14], для групп с индексом $N > 15$ вырождение по константе распространения снимается, и аналитическое выражение для поля моды перестает работать.

Коэффициент разложения мод в цилиндрических координатах определяется следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^a \int_0^{2\pi} |\Psi^{s*}(r, \varphi) \Psi^s(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi}{\int_0^a \int_0^{2\pi} |\Psi^s(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi \int_0^a \int_0^{2\pi} |\Psi^g(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi}. \quad (4)$$

Следует отметить, что при перекрытии мод ступенчатого и градиентного световода с разными значениями азимутального параметра l интеграл перекрытия мод $\varepsilon \approx 0$, т.е. моды переходят друг в друга, если их азимутальные коэффициенты совпадают. На рис. 3 приведены значения коэффициента разложения мод LP_{1l} ступенчатого световода по модам LP_{lm} градиентного в зависимости от значения радиального параметра m для $l = 0, 1, 2, 4$. При расчете выбирались моды из групп с индексом $N < 15$. Видно, что LP_{01} моды световодов перекрываются друг с другом наиболее сильно. Для мод высших порядков ($l > 0$) оптимальное значение радиального параметра m отличается от единицы и увеличивается с ростом значения l .

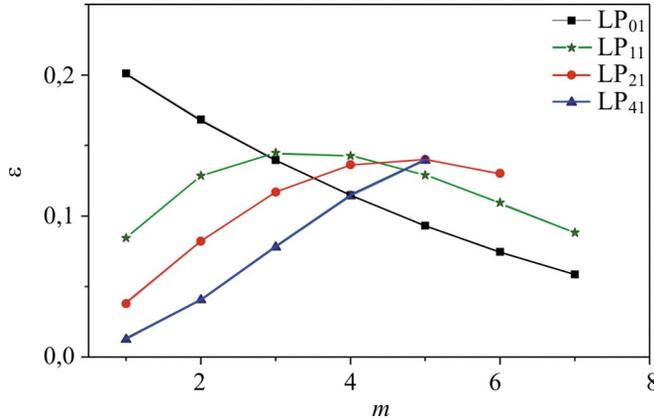


Рис. 3. Коэффициент разложения мод ступенчатого световода LP_{l1} по модам градиентного световода LP_{lm} в зависимости от радиального параметра m

3. Расчет интеграла перекрытия мод для ВКР процесса

В работе [13] авторы доказывают, что чистка пучка в градиентном световоде при процессе ВКР происходит из-за большего значения интеграла перекрытия для стоксовой моды LP₀₁, чем для мод высших порядков. Поэтому в результате конкуренции мод с большей вероятностью генерируется мода LP₀₁, а моды высших порядков подавляются. Расчет производился для световода с параметрами $d_g = 50$ мкм, $NA = 0,2$ и излучения накачки с длиной волны 1064 нм.

Используя алгоритм расчета из работы [13], оценим интегралы перекрытия мод в процессе ВКР для градиентных световодов с диаметром сердцевины 62,5 и 85 мкм, $NA_g = 0,27$ при накачке на длине волны 915 нм и ВКР-генерации на длине волны 953 нм.

Интеграл перекрытия мод без учета перекачки при распространении по волоконному световоду [13, 15]

$$\gamma = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{a_g} |\Psi_{\text{Stokes}}(r, \varphi)|^2 |\Psi_{\text{pump}}(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{a_g} |\Psi_{\text{Stokes}}(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi \int_0^{2\pi} \int_0^{a_g} |\Psi_{\text{pump}}(r, \varphi)|^2 r dr d\varphi}, \quad (5)$$

где поля мод накачки Ψ_{pump} и стоксовой компоненты Ψ_{pump} вычисляются по формуле (1). В таблице показан нормированный интеграл перекрытия для нескольких низших мод накачки и стоксовой компоненты

в градиентном световоде с диаметром сердцевины 62,5 мкм. Нормировка проводилась на значение интеграла перекрытия стоксовой моды LP_{01} с модой накачки LP_{01} . Следует отметить, что практически такие же значения получены для волокна с диаметром сердцевины 85 мкм, а также для 50-микронного световода в работе [13]. Следовательно, нормированный интеграл перекрытия слабо зависит от значений апертуры, диаметра сердцевины и длины волны накачки. Таблица показывает, что наибольший интеграл перекрытия у моды LP_{01} , затем следуют моды с равным значением параметров l и m (диагональ таблицы). Для мод с сильно отличающимся значением l нормированный интеграл перекрытия становится пренебрежительно малым.

Нормированный интеграл перекрытия мод для ВКР-процесса в 62,5-микронном градиентном световоде

		Моды накачки						
		LP_{01}	LP_{11}	LP_{21}	LP_{02}	LP_{31}	LP_{12}	LP_{41}
Моды стоксовой компоненты	LP_{01}	1	0,51	0,26	0,5	0,133	0,378	0,068
	LP_{11}	0,49	0,75	0,382	0,255	0,26	0,375	0,166
	LP_{21}	0,24	0,367	0,562	0,255	0,319	0,191	0,244
	LP_{02}	0,5	0,245	0,245	0,5	0,25	0,26	0,224
	LP_{31}	0,118	0,24	0,306	0,25	0,468	0,192	0,279
	LP_{12}	0,373	0,375	0,184	0,24	0,182	0,468	0,193
	LP_{41}	0,058	0,147	0,225	0,213	0,268	0,197	0,41

Таким образом, чистка пучка происходит благодаря большому интегралу перекрытия для моды LP_{01} . Однако полный коэффициент ВКР-усиления зависит также от распределения мощности накачки по модам световода. Поэтому, если мощность накачки в моде LP_{01} не-большая по сравнению с другими модами, в процессе ВКР будут генерироваться моды высших порядков, близких к LP_{01} .

4. Оценка коэффициента ВКР-усиления и порога генерации ВКР-лазера

Зная интеграл перекрытия мод γ , можно оценить коэффициент ВКР-усиления в градиентном световоде с $d_g = 62,5$ мкм и $NA_g = 0,27$. В таком световоде по сердцевине распространяется $N_g = 838$ направляющим модам. Будем считать, что мощность накачки равномерно распределена между N_g модами, а стоксова компонента ВКР генерируется только в LP_{01} моде. Тогда полный коэффициент усиления ВКР можно записать следующим образом:

$$g = \frac{g_R}{N} \sum_{n=1}^N \gamma_n, \quad (6)$$

где γ_n – интеграл перекрытия стоксовой моды с n -ной модой накачки; g_R – максимальный коэффициент ВКР-усиления. Концентрация GeO_2 в сердцевине градиентного световода $\approx 20\%$, что соответствует $g_R \approx 1,9 \cdot 10^{-13}$ м/Вт вблизи 1 мкм [16]. Величина g , оцененная из формулы (6), равна $0,12 \text{ Вт}^{-1} \text{ км}^{-1}$. Часть излучения накачки распространяется в вытекающих модах, которых $V^2/12 = 279$ штук. Эти моды имеют малый интеграл перекрытия со стоксовой модой LP_{01} и не участвуют в ВКР-преобразовании, поэтому их учет приведет к уменьшению полного усиления g до $0,09 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$. Эта величина близка к экспериментально измеренному значению $0,053 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$ для световода с диаметром сердцевины 62,5 мкм [7].

Оценим порог генерации ВКР-лазера с линейным резонатором, сформированным плотной ВБР и прямым сколом волокна. Коэффициенты отражения R_1 и R_2 равны 0,9 и 0,04 соответственно. В данном случае порог генерации

$$P_{th} = \frac{2\alpha_s L - \ln(R_1 R_2)}{2g L_{eff}}, \quad (7)$$

где L_{eff} – эффективная длина волокна, $L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha_p L)) / \alpha_p$; α_s и α_p – линейные потери на длине волны генерации и накачки соответственно. На рис. 4 показаны значения порога генерации для градиентного волокна с диаметром сердцевины 62,5 мкм (пунктирная линия) и 85 мкм (сплошная линия). В расчете использовались значения потерь, указанные производителями волокон: $\alpha_{s_{62,5}} = 1,7$ дБ/км, $\alpha_{p_{62,5}} = 2$ дБ/км, $\alpha_{s_{85}} = 2,7$ дБ/км, $\alpha_{p_{85}} = 3$ дБ/км. Коэффициент ВКР-усиления в 85-микронном световоде уменьшается по сравнению с 62,5-микронным на величину отношения площадей мод, т.е. $g_{85} \approx g_{62,5} (d_{62,5}/d_{85})^2$. При $g_{62,5} = 0,053 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$ величина g_{85} равна $0,029 \text{ (Вт} \cdot \text{км)}^{-1}$.

Из рис. 4 видно, что минимальное значение порога ВКР-лазера с 85-микронным световодом составляет 94 Вт при $L = 2$ км, что в 2,7 раза выше порога 62,5-микронного световода. Рост порога связан как с уменьшением коэффициента усиления ВКР из-за увеличения диаметра сердцевины, так и с ростом линейных потерь накачки и стоксовой компо-

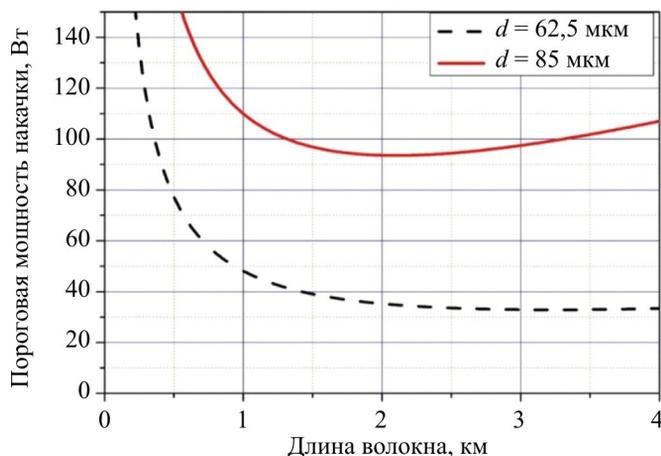


Рис. 4. Пороговая мощность накачки многомодового ВКР-лазера в зависимости от длины градиентного волокна с диаметром сердцевины 62,5 мкм (пунктирная линия) и 85 мкм (сплошная линия)

ненты ВКР. Однако увеличение диаметра сердцевины позволяет заводить в световод больше мощности накачки. Для существенного превышения порога генерации в данном случае необходимо иметь ЛД мощностью не менее 150 Вт.

Заключение

Таким образом, моделирование на основе экспериментальных данных показало, что значения нормированных интегралов перекрытия соответствующих мод накачки и стоксовой волны не зависят от диаметра сердцевины градиентного световода (в диапазоне 50–85 мкм), соответственно, эффект чистки пучков ВКР-лазере (т.е. улучшение качества генерируемого пучка по сравнению с пучком многомодовой накачки) с разными световодами будет примерно одинаковым. При этом длина градиентного световода, обеспечивающая минимальный порог генерации ВКР-лазера с многомодовой оптической накачкой, также слабо зависит от диаметра сердцевины световода и составляет около 2 км. Однако, как показывает эксперимент, максимальную мощность и эффективность генерации первой стоксовой компоненты ограничивает выход в генерацию второй стоксовой компоненты, порог которой сильно снижен из-за уменьшения как минимум на порядок сечения пучка (эффект чистки) первой стоксовой компоненты по сравнению с накачкой. Для увеличения порога второй стоксовой компоненты не-

обходимо существенно уменьшить длину световода (<1 км). В этом случае для заметного превышения над порогом генерации потребуются завести многомодовую мощность накачки более 75 и 150 Вт для световодов 62,5 и 85 мкм соответственно. При этом для стандартных мощных лазерных диодов с выходом в ступенчатый многомодовый световод с сердцевиной 105 мкм коэффициент заведения для 85 мкм световода будет существенно выше.

Работа выполнена за счет Российского научного фонда (грант № 14-22-00118).

Список литературы

1. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, №10. – С. 881–900.
2. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. High power fiber lasers: current status and future perspectives // JOSA B. – 2010. – Vol. 27, no. 11. – P. B63–B92.
3. High-power continuous-wave cladding-pumped Raman fiber laser / C.A. Codemard, P. Dupriez, Y. Jeong, J.K. Sahu, M. Ibsen, J. Nilsson // Optics Letters. – 2006. – Vol. 31, no. 15. – P. 2290–2292.
4. 100 W CW cladding pumped Raman fiber laser at 1120 nm / C.A. Codemard, J. Ji, J.K. Sahu, J. Nilsson // Proc. SPIE. – 2010. – Vol. 7580, no. 75801N. – P. 1–7.
5. Baek S.H., Roh W.B. Single-mode Raman fiber laser based on a multimode fiber // Optics Letters. – 2004. – Vol. 29, no. 2. – P. 153–155.
6. Use of a continuous wave Raman fiber laser in graded-index multimode fiber for SRS beam combination / N.B. Terry, K.T. Engel, T.G. Alley, T.H. Russell // Opt. Express. – 2007. – Vol.15, no. 2. – P. 602–607.
7. An LD-pumped Raman fiber laser operating below 1 μm / S.I. Kablukov, E.I. Dontsova, E.A. Zlobina, I.N. Nемов, A.A. Vlasov, S.A. Babin // Laser Phys. Lett. – 2013. – Vol. 10, no. 085103. – P. 1–4.
8. Yao T., Nilsson J. Fibre Raman laser directly pumped by multimode laser diode at 975 nm // CLEO Europe – IQEC 2013, Technical Digest (CD). – Paper CJ-9.2THU.
9. Yao T. and Nilsson J. 835 nm fiber Raman laser pulse pumped by a multimode laser diode at 806 nm // JOSA B. – 2014. – Vol. 31, no. 4. – P. 882–888.

10. Внутррезонаторное удвоение частоты генерации в широко-апертурном аргоновом лазере / С.Р. Абдуллина, С.А. Бабин, А.А. Власов, С.И. Каблуков // *Квантовая электроника*. – 2005. – Т. 35, № 9. – С. 857–861.

11. Multimode fiber lasers based on Bragg gratings and double-clad Yb-doped fibers / A.S. Kurkov, D.A. Gruk, O.I. Medvedkov [et al.] // *Laser Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 1, no. 9. – P. 473–475.

12. Hallam A.G Mode control in multimode optical fibre and its applications: PhD thesis. – Aston University, 2007.

13. Terry N.B., Alley T.G., Russell T.H. An explanation of SRS beam cleanup in graded-index fibers and the absence of SRS beam cleanup in step-index fibers // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 5, no. 26. – P. 17509–17519.

14. Mafi A. Pulse propagation in a short nonlinear graded-index multimode optical fiber // *J. Lightwave Tech.* – 2012. – Vol. 30, no. 17. – P. 2803–2811.

15. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. – 3rd ed. – San Diego: Academic Press, 2001. – 467 p.

16. Influence of the symmetry rules for Raman susceptibility on the accuracy of nonlinear index measurements in optical fibers / A. Martı́nez-Rios, A.N. Starodumov, Y.O. Barmenkov, V.N. Filippov, I. Torres-Gomez // *JOSA B*. – 2001. – Vol. 18, no. 6. – P. 794–803.

References

1. Kurkov A.S., Dianov E.M. Nепrерывные волоконные лазеры средней мощности [CW fiber lasers with average power]. *Квантовая электроника*, 2004, vol. 34, no. 10, pp. 881-900.

2. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. High power fiber lasers: current status and future perspectives. *JOSA B*, 2010, vol. 27, no. 11, pp. B63-B92.

3. Codemard C.A., Dupriez P., Jeong Y., Sahu J.K., Ibsen M., Nilsson J. High-power continuous-wave cladding-pumped Raman fiber laser. *Optics Letters*, 2006, vol. 31, no. 15, pp. 2290-2292.

4. Codemard C.A., Ji J., Sahu J.K., Nilsson J. 100 W CW cladding pumped Raman fiber laser at 1120 nm. *Proc. SPIE*, 2010, vol. 7580, no. 75801N, pp. 1-7.

5. Baek S.H., Roh W.B. Single-mode Raman fiber laser based on a multimode fiber. *Optics Letters*, 2004, vol. 29, no. 2, pp. 153-155.

6. Terry N.B., Engel K.T., Alley T.G., Russell T.H. Use of a continuous wave Raman fiber laser in graded-index multimode fiber for SRS beam combination. *Opt. Express*, 2007, vol. 15, no. 2, pp. 602-607.

7. Kablukov S.I., Dontsova E.I., Zlobina E.A., Nemov I.N., Vlasov A.A., Babin S.A. An LD-pumped Raman fiber laser operating below 1 μm . *Laser Phys. Lett.*, 2013, vol. 10, no. 085103, pp. 1-4.

8. Yao T. and Nilsson J. Fibre Raman laser directly pumped by multimode laser diode at 975 nm. *CLEO Europe – IQEC 2013, Technical Digest (CD)*, paper CJ-9.2THU.

9. Yao T., Nilsson J. 835 nm fiber Raman laser pulse pumped by a multimode laser diode at 806 nm. *JOSA B.*, 2014, vol. 31, no. 4, pp. 882-888.

10. Abdullina S.R., Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I. Vnutrirezonatornoe udvoenie chastoty generatsii v shirokoaperturnom argonovom lazere [Intracavity frequency doubling of generation in wide-aperture argon laser]. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 9, pp. 857-861.

11. Kurkov A.S., Grukh D.A., Medvedkov O.I. [et al.] Multimode fiber lasers based on Bragg gratings and double-clad Yb-doped fibers. *Laser Phys. Lett.*, 2004, vol. 1, no. 9, pp. 473-475.

12. Hallam A.G. Mode control in multimode optical fibre and its applications. Ph.D. thesis. Aston University, 2007.

13. Terry N.B., Alley T.G., Russell T.H. An explanation of SRS beam cleanup in graded-index fibers and the absence of SRS beam cleanup in step-index fibers. *Opt. Express.*, 2007, vol. 15, no. 26, pp. 17509-17519.

14. Mafi A. Pulse propagation in a short nonlinear graded-index multimode optical fiber. *J. Lightwave Tech.*, 2012, vol. 30, no. 17, pp. 2803-2811.

15. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. San Diego: Academic Press, 2001. 467 p.

16. Martı́nez-Rios A., Starodumov A.N., Barmenkov Y.O., Filippov V.N., Torres-Gomez I. Influence of the symmetry rules for Raman susceptibility on the accuracy of nonlinear index measurements in optical fibers. *JOSA B.*, 2001, vol. 18, no. 6, pp. 794-803.

Получено 5.03.2015