

Использование одномодовой накачки в качестве метода подавления модовой нестабильности в волоконных лазерах на примере узкополосного Yb-лазера мощностью 100 Вт

А.А.Сурин, А.А.Мольков, Т.Е.Борисенко, К.Ю.Прусаков

Предложен метод увеличения порога модовой нестабильности в волоконных лазерах. С его использованием создан мощный узкополосный (с шириной линии ~ 0.1 нм), полностью волоконный Yb-лазер с линейной поляризацией излучения и порогом модовой нестабильности более 100 Вт.

Ключевые слова: волоконный лазер, модовая нестабильность, линейно поляризованное лазерное излучение, непрерывный лазер.

1. Введение

Благодаря рекордным мощностям оптического излучения, надежности и высокому качеству пучка волоконные Yb-лазеры стали незаменимым инструментом, используемым в промышленности и в научных исследованиях [1]. На сегодняшний день выходная мощность волоконных одномодовых лазеров превышает единицы киловатт в непрерывном режиме и сотни киловатт в импульсном режиме [2]. Такие лазеры реализуются с использованием различных оптических схем, позволяющих получать поляризованное и неполяризованное излучение на разных длинах волн в диапазоне 0.98–1.15 мкм [3]. Однако ширина линии излучения подобных лазеров в полностью волоконном исполнении довольно большая (выше 1 нм). До сих пор генерация излучения с относительно небольшой мощностью (сотни ватт) и с малой (~ 0.1 нм) шириной линии непосредственно в маломодовом активном Yb-волокне затруднена из-за эффекта модовой нестабильности (МН) [4].

В то же время мощные узкополосные (с шириной линии менее 0.1 нм) непрерывные лазеры ближнего ИК диапазона интересны, например, как источники накачки для нелинейных преобразований в нелинейно-оптических кристаллах, в частности для генерации второй гармоники и получения мощного (единицы ватт) непрерывного излучения в видимом и УФ диапазонах спектра [5, 6]. И как раз для генерации зеленого излучения с длинами волн, близкими к 532 нм, в качестве лазера накачки подходит узкополосный, полностью волоконный итербиевый лазер.

А.А.Сурин, Т.Е.Борисенко. ООО НТО «ИРЭ – Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1, стр. 3; e-mail: asurin@ntoire-polus.ru

А.А.Мольков, К.Ю.Прусаков. ООО НТО «ИРЭ – Полус», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1, стр. 3; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9

Поступила в редакцию 9 октября 2018 г., после доработки – 29 октября 2018 г.

Настоящая статья посвящена разработке такого лазера. Нами предложен метод увеличения порога МН при генерации мощного узкополосного излучения в полностью волоконном итербиевом лазере на маломодовом активном волокне.

2. Подавление МН

Эффект МН – перекачка энергии из основной моды в высшие – наблюдается в усилителях и лазерных системах, работающих как в непрерывном режиме с узкой линией излучения, так и в импульсном режиме с широким спектром излучения [7, 8]. Впервые эффект МН наблюдался в волокнах с большим диаметром сердцевины (30–50 мкм), но похожий эффект имеет место и в маломодовых активных волокнах с диаметром сердцевины ~ 10 мкм [4, 9]. МН приводит к модуляции выходной мощности [7–9] и является одним из факторов, ограничивающих получение излучения с большой мощностью и узкой линией в волоконных лазерах и усилителях.

Перекачка мощности из основной моды в высшие происходит из-за периодической модуляции показателя преломления (решетки показателя преломления), наведенной в волокне распространяющимся по нему излучением [10]. Такая длиннопериодная решетка показателя преломления возникает из-за интерференции между основной и высшими модами, при этом выделяют два механизма, ответственные за появление решетки, – тепловой и инверсионный [10, 11]. Порог МН в усилителе – уровень выходной мощности, при котором начинают проявляться искажения пучка и нестабильность выходной мощности, зависит от многих параметров: ширины линии лазерного излучения, уровня обратно отраженных сигналов, уровня входного сигнала усилителя, состояния поляризации излучения.

В работах [12, 13] было показано, что порог МН можно понизить, уменьшая эффективность поглощения накачки. Однако при этом необходимо увеличивать длину активной среды, что приводит к снижению порогов нелинейных эффектов. Поэтому в мощных лазерах требуется оптимизация параметров оптического волокна (его длины и эффективности поглощения накачки) с учетом как МН, так и нелинейных эффектов. Например, в работе [14]

для накачки лазера использовались полупроводниковые диоды двух типов с разными длинами волн излучения (975 и 915 нм) и активное волокно с двойной оболочкой с диаметром сердцевины 21 мкм и числовой апертурой $NA = 0.066$ (диаметр оболочки равен 400 мкм, $NA = 0.46$), поглощение излучения накачки на длине волн $\lambda = 915$ нм составляло 0.48 дБ/м. При диодной накачке только излучением на $\lambda = 975$ нм МН наблюдалась при выходной мощности ~ 1 кВт, а в случае многомодовой диодной накачки на $\lambda = 915$ нм была получена мощность 1.5 кВт без возникновения МН, однако эффективность лазера при этом уменьшилась. При совместной накачке диодами, излучающими на длинах волн 975 и 915 нм авторы [14] получили излучение мощностью 2 кВт, не достигнув порога МН, т.е. увеличили порог более чем в два раза.

Стоит отметить, что использование чисто одномодового активного волокна позволяет получить мощное непрерывное, линейно поляризованное лазерное излучение с узкой линией без возникновения МН. Так, в работе [15] для генерации излучения мощностью 100 Вт на $\lambda = 1120$ нм с шириной линии 0.2 нм применялось одномодовое активное волокно PLMA-YDF-10/125 (Nufern, США) с $NA = 0.075$ и диаметром сердцевины 10 мкм (длина волны отсечки составила 980 нм). В случае одномодового активного волокна об эффекте МН говорить не приходится, поскольку ее причиной является интерференция основной моды с высшими модами, которые в данном случае просто не поддерживаются сердцевиной волокна. В работе [16] было получено излучение мощностью 100 Вт с шириной линии 0.26 нм на $\lambda = 1098$ нм в иттербиевом волокне. Используемое в этой работе активное волокно с диаметром сердцевины $d = 8$ мкм и $NA = 0.11$ для излучения на $\lambda = 1098$ нм хотя и является маломодовым, но его длина волны отсечки составляет 1149 нм, что близко к длине волны генерации 1098 нм. Поскольку точность определения параметров волокна не указана, то длина волны отсечки вполне может быть меньше длины сигнальной волны: если, например, диаметр сердцевины $d = 7.6$ мкм вместо заявляемого $d = 8$ мкм, то длина волны отсечки становится равной 1092 нм, если же $NA = 0.1$, а не 0.11, то длина волны отсечки составляет 1045 нм, т.е. волокно является уже одномодовым. Тем не менее, даже если генерация высших мод возможна, то в [16] о ней не упоминается. По измерению выходной мощности исследуемого лазера авторы [16] никак не могли бы определить достижение порога МН, т.к. вывод излучения осуществлялся ими непосредственно из самого маломодового активного волокна, а измерений качества пучка или осциллограмм выходного излучения не проводилось. Кроме того, излучение было неполяризованным, поэтому порог МН, возможно, даже и не достигался.

При получении линейно поляризованного излучения киловаттной мощности в маломодовых активных волокнах подавление МН осуществляется за счет определенного способа укладки волокна [17, 18] и подбора длины волны излучения накачки лазерного диода [13], что может быть неудобно или даже неэффективно в отдельных случаях.

В настоящей работе мы предлагаем новый метод борьбы с МН в маломодовых активных иттербиевых волокнах с $NA > 0.1$ и с диаметрами сердцевины более 10 мкм (длина волны отсечки превышает 1300 нм) – накачку активного волокна одномодовым излучением непосредственно в сердцевину. При многомодовой накачке проис-

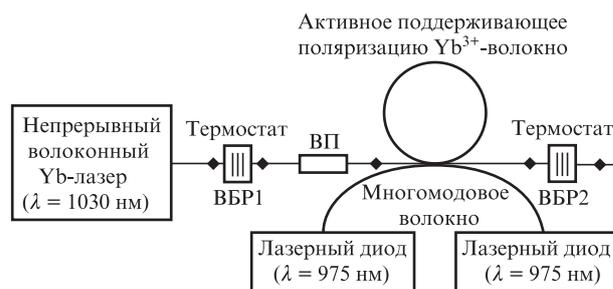


Рис. 1. Оптическая схема мощного узкополосного Yb-лазера, излучающего на $\lambda = 1072$ нм:

ВБР1 – решетка с большим коэффициентом отражения для $\lambda = 1072$ нм; ВБР2 – решетка, служащая выходным зеркалом; ВП – волоконный поляризатор.

ходит равномерная «прокачка» всей сердцевины активного волокна, и коэффициент усиления для высших поперечных мод достаточно велик при достижении насыщения усиления основной моды. В результате этого решетка показателя преломления, ответственная за МН и наводимая при интерференции высших мод с основной модой, имеет большую глубину модуляции. В нашем же случае накачка активного волокна будет проводиться преимущественно в области распространения основной моды (в зависимости от перекрытия основных мод накачки и сигнала), поэтому инверсия в среде на «хвостах» основной моды будет значительно меньше и, значит, индуцируемая решетка будет иметь меньшую глубину модуляции.

Оптическая схема иттербиевого волоконного лазера представлена на рис. 1. В качестве активной среды использовалось поддерживающее поляризацию GTWave-волокно (IPG Photonics, США), легированное ионами Yb^{3+} . Длина этого волокна составляет 10 м, диаметр световодящей сердцевины – 10 мкм. Для многомодовой накачки применялись полупроводниковые диоды с длиной волны излучения 975 нм. Узкополосные (ширина полосы отражения менее 0.1 нм) решетки на $\lambda = 1072$ нм, записанные на согласованном по основной моде пассивном одномодовом волокне, поддерживающем поляризацию, помещались в термостаты для согласования спектров отражения. Высшие моды излучения высвечивались на сварках одномодовых пассивных волокон с активным маломодовым волокном, т.е. эти сварки выступали в роли модовых фильтров. В резонаторе находился волоконный поляризатор, обеспечивающий генерацию линейно поляризованного лазерного излучения. Одномодовая накачка осуществлялась непосредственно в сердцевину активного волокна линейно поляризованным излучением одномодового волоконного иттербиевого лазера на $\lambda = 1030$ нм (НТО «ИРЭ–Полус», Россия).

3. Результаты экспериментов

При использовании только диодной накачки излучением на $\lambda = 975$ нм эффект МН наблюдается при мощности выходного излучения 1.5 Вт. Осциллограмма мощности излучения при такой выходной мощности приведена на рис.2.

Периодическая последовательность импульсов на фоне непрерывного сигнала – проявление МН. Дальнейшее повышение мощности накачки приводит к уменьшению выходной мощности, что также свидетельствует о достижении порога МН.

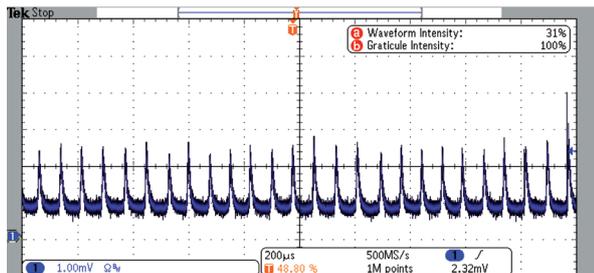


Рис.2. Осциллограмма мощности выходного излучения лазера с накачкой многомодовым излучением на $\lambda = 975$ нм. Выходная мощность равна 1.5 Вт, скорость развертки – 200 мкс/дел.

При накачке одномодовым излучением на $\lambda = 1030$ нм порог МН повышается – нам не удалось достичь его вплоть до выходной мощности 50 Вт (дальнейшее повышение мощности было ограничено мощностью излучения используемого Yb-лазера на $\lambda = 1030$ нм). Результаты эксперимента представлены на рис.3.

Было получено излучение на $\lambda = 1072$ нм мощностью более 50 Вт с эффективностью $\sim 78\%$ и шириной линии 0.11 нм в простой схеме лазера (рис.1). Кроме того, в отличие от работы [14], в данном случае мы не уменьшаем, а наоборот увеличиваем эффективность лазера за счет уменьшения квантового дефекта между энергиями квантов излучения накачки и «полезного» лазерного излучения.

Поскольку мощность одномодовой накачки была ограничена, для достижения порога МН дополнительно ис-

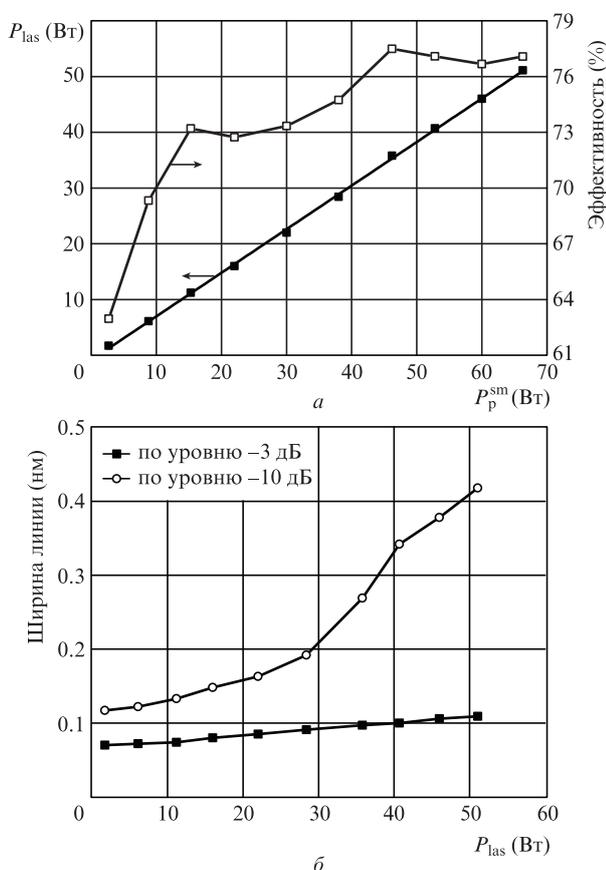


Рис.3. Зависимости мощности P_{las} выходного излучения лазера на $\lambda = 1072$ нм и его эффективности от мощности P_p^{sm} одномодового излучения накачки на $\lambda = 1030$ нм (а), а также зависимость ширины линии генерации от P_{las} (б).

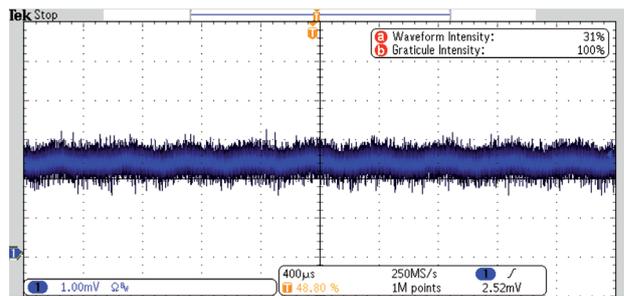


Рис.4. Осциллограмма мощности выходного излучения лазера при $P_{\text{las}} = 100$ Вт. Скорость развертки – 400 мкс/дел.

пользовалась накачка многомодовым излучением на $\lambda = 975$ нм, в результате чего было получено излучение мощностью более 100 Вт с шириной линии 0.15 нм.

Осциллограмма лазерного излучения при $P_{\text{las}} = 100$ Вт представлена на рис.4. При этой мощности достигается порог МН, что проявляется в виде периодических колебаний выходной мощности с частотами порядка единиц кГц.

Было установлено, что при совместном использовании для накачки лазерных диодов и одномодового лазера порог МН зависит от мощности одномодовой накачки: чем она больше, тем выше порог МН (рис.5).

На основе полученных результатов был создан оптимизированный вариант Yb-лазера, в котором использовалось активное Yb³⁺-волокно длиной 1.5 м и более мощный одномодовый Yb-лазер накачки (многомодовая накачка в нем отсутствовала). Зависимости выходной мощности и эффективности лазера от мощности одномодового излучения накачки показаны на рис.6.

На рис.7 приведены изображение поперечного сечения пучка и распределения интенсивности излучения вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений, измеренные при выходной мощности 100 Вт. Параметр качества пучка M^2 , измеренный с помощью прибора BeamMap2 (DataRay, США) был равен 1.05. Также была измерена степень поляризации выходного линейно поляризованного излучения, составившая более 99%. Отношение мощностей излучения двух взаимно перпендикулярных поля-

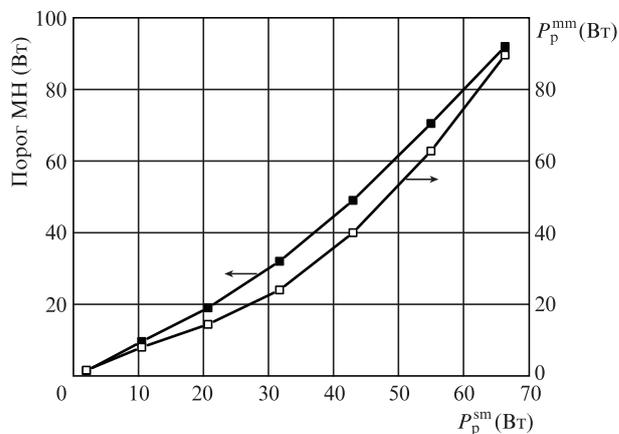


Рис.5. Зависимость порога МН при совместном использовании для накачки лазерных диодов и одномодового лазера от мощности P_p^{sm} . Черные квадраты – значения P_{las} , при которых появляется МН, белые квадраты – значения мощности P_p^{mm} добавочного многомодового излучения накачки, необходимого при заданной мощности P_p^{sm} для достижения порога МН.

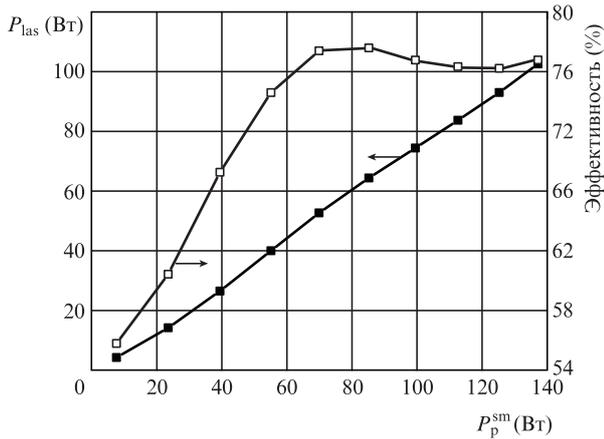


Рис.6. Зависимости выходной мощности и эффективности лазера от мощности одномодового излучения накачки.

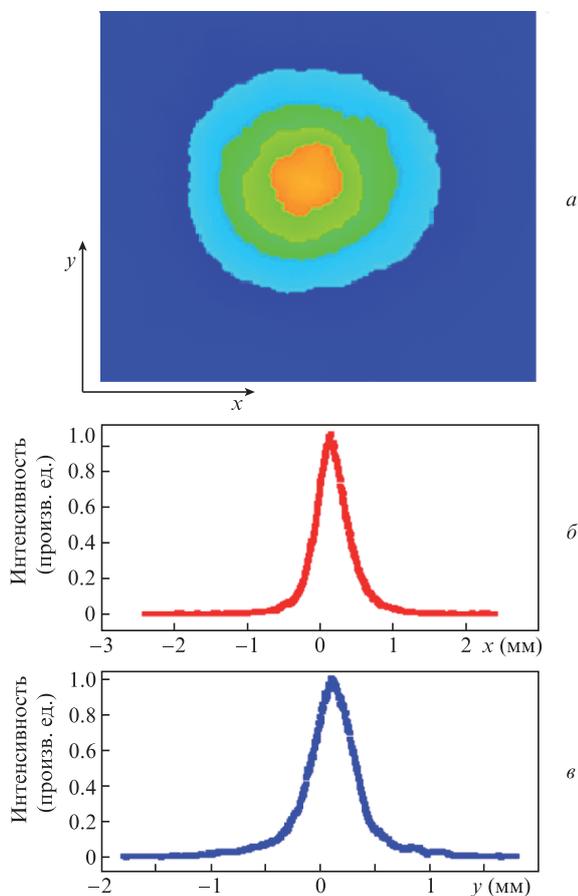


Рис.7. Изображение поперечного сечения пучка при выходной мощности 100 Вт (а) и распределения интенсивности излучения вдоль осей x (б) и y (в).

ризации равнялось 22 дБ. Оно определялось следующим образом: с помощью призмы из кальцита пучок разделялся на два пучка со взаимно перпендикулярными поляризациями излучения, после чего измерялись мощности излучения в каждом пучке.

4. Выводы

Предложен новый метод подавления МН в иттербиевых волоконных лазерах на основе маломодовых активных волокон, значительно снижающий чувствительность порога МН к ширине спектра излучения и обратным отражениям, заключающийся в использовании для накачки одномодового лазерного излучения. Порог МН повышается в результате того, что при одномодовой накачке инверсия населенностей создается преимущественно лишь в области распространения основной поперечной моды сигнального излучения. Стоит отметить, что это должно быть справедливо для любых волоконных лазеров и усилителей на основе маломодовых активных волокон, хотя в настоящей работе экспериментальной проверки не проводилось. На основе данного метода разработан полностью волоконный, непрерывный иттербиевый лазер, генерирующий одномодовое, линейно поляризованное излучение на $\lambda = 1072$ нм мощностью более 100 Вт с шириной линии 0.15 нм, — перспективный вариант источника накачки для генерации второй гармоники в кристаллах с периодической доменной структурой.

- Gapontsev V., Shcherbakov E., Fomin V., Abramov A., Doronkin A. *Proc. 17th Int. Conf. «Laser Optics 2016»* (St.-Petersburg, Russia, 2016).
- www.ipgphotonics.com.
- Zervas M.N., Codemar C.A. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20** (5), 0904123 (2014).
- Kuznetsov M., Vershinin O., Tyrtshnyy V., Antipov O. *Opt. Express*, **22** (24), 29714 (2014).
- Georgiev D., Gapontsev V.P., Dronov A.G., Vyatkin M.Y., Rulkov A.B., Popov S.V., Taylor J.R. *Opt. Express*, **13** (18), 6772 (2005).
- Surin A.A., Borisenko T.E., Larin S.V. *Opt. Lett.*, **41** (11), 2644 (2016).
- Stutzki F., Otto H.-J., Jansen F., Gaida C., Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. *Opt. Express*, **36** (23), 4572 (2011).
- Jauregui C., Eidam T., Limpert J., Tünnermann A. *Opt. Express*, **19** (4), 3258 (2011).
- Tyrtshnyy V., Vershinin O. *Proc. Int. Symp. «High-Power Lasers and Their Applications»* (St.-Petersburg, Russia, 2010, paper TuSy, p. 04.M).
- Jauregui C., Eidam T., Otto H.-J., Stutzki F., Jansen F., Limpert J., Tünnermann A. *Opt. Express*, **20** (12), 12912 (2012).
- Jauregui C., Eidam T., Otto H.-J., Stutzki F., Jansen F., Limpert J., Tünnermann A. *Opt. Express*, **19** (11), 10180 (2011).
- Hejaz K., Norouze A., Poozesh R., Heidariazar A., Roohforouz A., Nasirabad R.R., Jafari N.T., Golshan A.H., Babazadeh A., Lafouti M. *Laser Phys.*, **24** (2), 23102 (2014).
- Tao R., Ma P., Wang X., Zhou P., Liu Z. *J. Opt.*, **17** (4), 45504 (2015).
- Yang B., Zhang H., Wang X., Su R., Tao R., Zhou P., Xu X., Lu Q. *J. Opt.*, **18** (10), 105803 (2016).
- Wang J., Hu J., Zhang L., Gu X., Chen J., Feng Y. *Opt. Express*, **20** (27), 28373 (2012).
- Jovanovic N., Aslund M., Fuerbach A., Jackson S.D., Marshall G.D., Withford M.J. *Opt. Lett.*, **32** (19), 2804 (2007).
- Yang B., Zhang H., Shi C., Wang X., Zhou P., Xu X., Chen J., Liu Z., Lu A.Q. *Opt. Express*, **24** (24), 27828 (2016).
- Wang X., Zhang H., Tao R., Su R., Ma P., Zhou P., Xu X. *Proc. Conf. on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conf. (CLEO/Europe-EQEC)* (Munich, Germany, 2017).