УДК 631.373

Р.В. Дробышев^{1,2}, И.А. Лобач^{1,2,3}, С.И. Каблуков¹¹ Институт автоматизации электрометрии СО РАН,
Новосибирск, Россия² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия³ Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН,
Пермь, Россия

ВОЛОКОННЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ЛАЗЕР С САМОСКАНИРОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКНА С УВЕЛИЧЕННОЙ ПЛОЩАДЬЮ ПОЛЯ МОДЫ

Собран и исследован одночастотный волоконный лазер на основе иттербиевого волокна с увеличенной площадью поля моды сердцевины в качестве активной среды с самосканированием частоты в области 1055–1069 нм. Максимальные выходная средняя и пиковая мощность составили 1,4 и 6 Вт соответственно. Характеристики лазера были сопоставлены с параметрами аналогичного лазера на основе волокна со стандартной сердцевиной. Установлено, что порог нестабильности сканирования частоты в таком лазере связан с переходом в режим многочастотной генерации.

Ключевые слова: волоконный лазер, сканирование частоты, импульсный лазер, иттербий.

R.V. Drobyshev^{1,2}, I.A. Lobach^{1,2,3}, S.I. Kablukov¹¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberia Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation³ Laboratory of photonics, Perm Scientific Center of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

SELF-SWEEPING YB-DOPED FIBER LASER BASED ON LARGE-MODE AREA FIBER

In this paper single-frequency ytterbium self-sweeping laser based on large-mode area fiber with sweeping range of 1055–1069 nm is developed and investigated. Maximum output average and peak power is equal to 1,4 and 6 W, respectively. The laser characteristics have been compared with parameters for similar laser based on fiber with standard core. It is found that the instability threshold for self-sweeping operation in the laser is associated with the transition to a multi-frequency lasing.

Keywords: fiber laser, frequency sweeping, pulsed laser, ytterbium.

Эффект самосканирования оптической частоты впервые наблюдался в рубиновом лазере в 1962 году [1]. Затем спустя почти 50 лет данный эффект был обнаружен в волоконных лазерах [2, 3]. При этом диапазон сканирования в волоконных лазерах стал существенно шире (более 20 нм) [4]. Эффект самосканирования обусловлен тем, что во время генерации в активной среде возникают динамические решетки коэффициента усиления и показателя преломления, которые влияют на генерацию последующих мод, что приводит к постоянному изменению спектра выходного сигнала [4]. В волоконных лазерах наблюдается сканирование длины волны генерации как в сторону увеличения [4], так и в сторону уменьшения [5]. Наиболее популярным направлением является изучение сканирования в иттербиевых волоконных лазерах вблизи 1 мкм [2–4], однако не прекращаются попытки расширения диапазона сканирования за счет использования других активных сред. Эффект самосканирования уже удалось наблюдать в висмутовом лазере в области 1,46 мкм [6], в эрбиевом лазере в области 1,5 мкм [7], в тулий-гольмиевом лазере в области 1,9 мкм [8], в гольмиевом лазере в области 2,1 мкм [9]. Характеристики волоконного самосканирующего лазера могут составить конкуренцию другим перестраиваемым источникам в ряде приложений. Так, например, подобный лазер был применен для характеристики различных типов волоконных брэгговских решеток [10, 11] и нелинейных свойств периодически полингованных волокон [12]. В работе [13] было описано устройство опроса на базе сканирующего лазера. При этом существует ряд приложений, для которых требуется перестраиваемое излучение с высокой пиковой мощностью. Например, к таким приложениям можно отнести дифференциальную абсорбционную спектроскопию для зондирования атмосферы [14] или генерацию гармоник высших порядков [12]. Максимальная выходная мощность, при которой наблюдается эффект самосканирования частоты, ограничивается несколькими факторами. В работе [3] указано, что переходный сценарий во многом определяется спектральной шириной отражателей, используемых в лазере. При применении в качестве отражателя волоконной брэгговской решетки при достижении критической мощности лазер переходит в непрерывный режим с генерацией в области максимума отражения отражателя. В случае широкополосных отражателей при большой мощности в лазере появляется неустойчивость, вызванная вынужденным рассеянием Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ): в спектре по-

являются новые спектральные компоненты, а временная динамика состоит из хаотичных гигантских импульсов. Подобные импульсы большой амплитуды могут существенно изменить динамический баланс потерь и усиления, что приводит к срыву сканирования частоты. Эффективное развитие вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна при достаточно больших пиковых мощностях во многом связано с тем, что ширина спектра одного импульса составляет менее 1 МГц [4, 6], что меньше ширины усиления пика ВРМБ, которая составляет несколько десятков мегагерц.

Есть работы, в которых исследуется вопрос увеличения порога ВРМБ в волоконных лазерах [15, 16]. В частности, математическое моделирование показывает, что к увеличению порога ВРМБ приводят увеличение площади поля моды сердцевин, укорочение длины резонатора, уменьшение коэффициента отражения выходного зеркала. Было также представлено, что порог ВРМБ для схем с накачкой со стороны выходного зеркала более высокий, чем для схем с накачкой со стороны плотного зеркала.

Поскольку режим сканирования достаточно чувствителен к длине резонатора [4] и коэффициенту отражения выходного зеркала [17], то с целью увеличения максимальной выходной пиковой мощности был реализован сканирующий иттербиевый лазер на основе волокна с увеличенной площадью поля моды сердцевин с сохранением состояния поляризации. Характеристики лазера были сравнены с характеристиками аналогичного (по длинам волокон и коэффициентам отражения зеркал) сканирующего лазера на основе стандартного иттербиевого волокна. Оба лазера работали в режиме одночастотного сканирования [4, 6], при котором оптическая частота генерации меняется между периодическими импульсами на одну частоту межмодовых биений резонатора. Результаты показали, что средняя и пиковая выходная мощность лазера с увеличенной площадью поля моды примерно в два раза выше, чем для лазера со стандартным размером сердцевин при прочих равных условиях. При этом не удалось получить ожидаемое увеличение порога неустойчивости, вызванной ВРМБ. Оказалось, что в лазере на основе волокна с увеличенной площадью поля моды порог неустойчивости носит иной характер и связан с переходом в многочастотный режим генерации, когда импульс состоит из нескольких продольных мод. Предложено объяснение такому поведению.

В ходе эксперимента был собран самосканирующий лазер на основе волокна с увеличенной площадью поля моды сердцевины с сохранением состояния поляризации. Схема лазера представлена на рис. 1, а. Лазерные диоды с длиной волны генерации вблизи 975 нм использовались в качестве накачки лазера. Активной средой лазера являлось иттербиевое волокно с диаметром сердцевины 11 мкм (Nufern PLMA-YDF-10/125-M) и длиной 2,6 м. В качестве зеркал резонатора использовались косой скол световода с коэффициентом отражения $\approx 0,3\%$ и кольцевое зеркало на основе ответвителя 20/80 с коэффициентом отражения $\approx 64\%$. Для фильтрации непоглощенного излучения накачки к выходу лазера был приварен кусок пассивного волокна длиной 0,3 м. В схему также был добавлен делитель поляризации, чтобы оставить в лазере только одну из двух поляризаций. Дополнительный ответвитель 95/5 использовался для вывода части излучения из резонатора с целью его дальнейшего анализа.

Рис. 1. Схемы волоконных самосканирующих лазеров на основе 11-микронного (а) и 5-микронного (б) волокна

Для сравнения был собран аналогичный лазер на основе волокон со стандартным размером сердцевины (рис. 1, б). Активной средой было иттербиевое волокно (Nufern PM-YDF-5/130-VIII) с диаметром

сердцевины 5 мкм и длиной 2,8 м. Поскольку роль поляризационного селектора выполняло волоконное кольцевое зеркало на основе фильтрующего разветвителя 20/80, вместо делителя поляризации был вставлен кусок пассивного волокна эквивалентной длины. В качестве зеркала резонатора использовались косой скол световода с коэффициентом отражения $\approx 0,3\%$ и кольцевое зеркало с коэффициентом отражения $\approx 64\%$. Из сравнения схем видно, что характеристики резонаторов двух лазеров близки друг другу (длина активных и пассивных волокон, коэффициенты отражения зеркал). Полная длина резонатора (частота межмодовых биений) составила 11 м (9,1 МГц) и 12 м (8,3 МГц) для лазеров на основе 5- и 11-микронного волокна соответственно.

Вначале была измерена спектральная динамика двух лазеров при помощи быстрого анализатора спектра (LSA, HighFinesse). Как видно на рис. 2, оба лазера работают в режиме сканирования частоты. Для лазеров на основе 5- и 11-микронного волокна диапазон сканирования составил 1047–1069 и 1055–1069 нм соответственно. Скорость сканирования в обеих схемах лазеров возрастает с увеличением мощности накачки и находится в пределах от 2,6 до 6,4 нм/с. Далее была измерена средняя выходная мощность генерации (рис. 3). Порог генерации составил примерно 1 Вт. Оказалось, что дифференциальная эффективность для лазера на основе 11-микронного волокна в два раза выше, чем для 5-микронного (27 против 12 %). При этом максимальная средняя мощность, для которой наблюдается режим самосканирования частоты, составила 1,0 и 1,4 Вт для лазеров на основе 5- и 11-микронного волокна соответственно. Это связано с тем, что порог неустойчивости по накачке для лазера с увеличенной площадью поля моды в полтора раза ниже, чем для второй схемы.

Далее при помощи быстрого фотодиода была исследована динамика интенсивности. Типичные осциллограммы приведены на рис. 4. Видно, что оба лазера генерируют практически периодические микросекундные импульсы. С увеличением мощности накачки наблюдаются рост пиковой мощности (см. рис. 3), уменьшение периода и длительности импульсов (рис. 5). При этом временные параметры (длительность и период) импульсов достаточно близки в двух схемах (см. рис. 5). Каждый импульс хорошо аппроксимировался функцией квадратичного гиперболического секанса [4, 6]. Стоит также отметить, что для лазера

Рис. 2. Долговременная динамика спектра для двух схем лазеров при мощности накачки 4,7 Вт

Рис. 3. Зависимость средней и пиковой мощности двух лазеров от мощности накачки (линиями показана линейная аппроксимация)

Рис. 4. Динамика интенсивности для лазеров на основе 5-микронного (а, в, д) и 11-микронного волокна (б, з, е) при различных мощностях накачки

Рис. 5. Средняя длительность и частота повторения импульсов при различных мощностях накачки для двух лазеров

с увеличенной площадью поля моды флуктуации пикового значения мощности были несколько больше, чем для второго лазера. При достижении мощности накачки более 9 Вт для лазера со стандартным размером поля моды наблюдается появление гигантских импульсов, которые приводят к срыву режима сканирования. Как было указано в работе [4], такая нестабильность вызвана процессом ВРМБ. Иное поведение имеет место для лазера с увеличенной площадью поля моды. При достижении мощности накачки более 6,5 Вт периодические импульсы в некоторый момент переходят в хаотичную генерацию с высокочастотной модуляцией. В работе [6] было указано, что такое поведение интенсивности связано с многочастотной генерацией: в каждый момент времени в резонаторе существует большое количество мод. Однако в отличие от работы [6], где в таком режиме наблюдалось стабильное сканирование частоты, в исследуемом лазере происходит частый срыв процесса сканирования.

Далее были измерены поляризационные свойства выходного излучения с помощью поляриметра. Было установлено, что степень поляризации выходного излучения близка к 100 %, а измеренная величина коэффициента экстинкции поляризации составила около 20 дБ в обеих схемах.

В лазерах также была изучена динамика оптической частоты в масштабе одного импульса. В работах [4, 6] было показано, что из-за изменения инверсной населенности во время генерации импульса происходит изменение показателя преломления, что приводит к так называемому частотному чирпу. Для этого была применена техника гетеродинирования, при которой излучение самосканирующего лазера смешивается с сигналом непрерывного одночастотного Nd:YAG-лазера [4]. При сближении оптических частот двух источников можно наблюдать сигнал их интерференции, который детектировался при помощи быстрого фотодетектора и осциллографа. Далее с помощью математической обработки из измеряемого сигнала выделялась гармоника, соответствующая биению двух волн. Анализируя период модуляции, можно вычислить зависимость относительной частоты от времени. Было установлено, что амплитуда частотного чирпа растет с увеличением мощности накачки. Как было показано в работах [4, 6], зависимость относительной частоты, умноженной на длительность импульса (нормированная частота), от времени, деленного на длитель-

ность импульса (нормированного времени), не зависит от мощности накачки и описывается функцией гиперболического тангенса с одним амплитудным параметром A . Действительно, нормированные кривые чирпа не зависят от мощности накачки и описываются гиперболическим тангенсом (рис. 6). Результаты показывают, что амплитуда частотного чирпа для лазера с увеличенной площадью поля моды ($A = 0,29$) почти в два раза меньше, чем для лазера на основе стандартного волокна ($A = 0,54$).

Рис. 6. Зависимость нормированной частоты от нормированного времени в масштабе одного импульса для двух схем лазеров (линиями показана аппроксимация гиперболическим тангенсом в соответствии с работой [6])

Таким образом, в ходе работы был собран и исследован волоконный самосканирующий лазер на основе иттербиевого волокна с увеличенной площадью поля моды сердцевин в качестве активной среды. Были измерены различные характеристики лазера (временная динамика интенсивности и спектра, мощность) и сопоставлены с параметрами аналогичного лазера на основе иттербиевого волокна со стандартной сердцевиной. Выходная пиковая мощность в лазере с увеличенным полем моды составила порядка 6 Вт, что в два раза выше, чем в лазере со стандартной сердцевиной. При этом лазеры обладают похожими динамическими характеристиками (длительность и частота импульсов, область сканирования). При увеличении выходной мощности наблюдается срыв сканирования. Для лазера на основе 5-микронного волокна нестабильность, вызванная ВРМБ, наблюдается при пиковой выходной

мощности порядка 3 Вт. Исходя из соотношения площадей сердцевин можно оценить порог неустойчивости для лазера с увеличенной сердцевиной ≈ 14 Вт. В действительности срыв режима сканирования происходит при существенно меньшей мощности генерации (≈ 6 Вт). В этом случае неустойчивость вызвана переходом в многочастотную генерацию, который происходит раньше, чем ВРМБ. Можно также заметить, что величина частотного чирпа для лазера с увеличенным полем моды в два раза меньше, чем для стандартного лазера. Этот факт может свидетельствовать о том, что амплитуды динамических решеток усиления и показателя преломления, которые ответственны за режим сканирования частоты, меньше для лазера с увеличенным полем моды. Это означает, что модовая селекция, вызванная динамическими решетками, происходит менее эффективно, что, в свою очередь, приводит к большим флуктуациям интенсивности, которые также наблюдаются в эксперименте, и более быстрому переходу в многочастотный режим. Вопрос о свойствах динамических решеток в таких лазерах и их зависимости от различных параметров резонатора пока остается открытым и требует дополнительного изучения.

Исследованный лазер может быть применен для зондирования атмосферы [14], генерации гармоник высших порядков [12] или в различных метрологических приложениях (измерение расстояния [18], скорости [19], вибрации [20]). Для части этих приложений требуется применение объемной оптики для управления лазерными пучками в свободном пространстве без заведения излучения в оптическое волокно. В случае создания полностью волоконных схем с применением волокон со стандартным размером сердцевины возможно использование так называемых адаптеров, модовых адаптеров, типичные потери на которых составляют менее 0,4 дБ [21].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-02-00449 А, а также при частичной финансовой поддержке Комплексной программы УрО РАН № 15-10-6-25.

Список литературы

1. Hughes T.P., Young K.M. Mode sequences in ruby laser emission // Nature. – 1962. – № 196. – P. 332–334.

2. Kir'yanov A.V., Il'ichev N.N. Self-induced laser line sweeping in an ytterbium fiber laser with nonresonant Fabry–Perot cavity // *Laser Phys. Lett.* – 2011. – № 8. – P. 305–312.
3. Broad-range self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser / I.A. Lobach, S.A. Babin, S.I. Kablukov, E.V. Podivilov // *Opt. Express.* – 2011. – № 19. – P. 17632–17640.
4. Self-scanned single-frequency operation of a fiber laser driven by a self-induced phase grating / I.A. Lobach, S.I. Kablukov, E.V. Podivilov, S.A. Babin // *Laser Phys. Lett.* – 2014. – № 11. – P. 045103.
5. Self-induced laser line sweeping and self-pulsing in double-cladber lasers in fabry-perot and unidirectional ring cavities / P. Peterka, P. Navrátil, B. Dussardier, R. Slavik, P. Honzátko, V. Kubecek // *Proc. SPIE.* – 2012. – Vol. 8433. – P. 843309-1.
6. Single-frequency Bismuth-doped fiber laser with quasi-continuous self-sweeping / I.A. Lobach, S.I. Kablukov, M.A. Melkumov, V.F. Khopin, S.A. Babin, E.M. Dianov // *Opt. Express.* – 2015. – № 23. – P. 24833–24842.
7. Self-induced laser line sweeping in tunable erbium-doped fiber laser / P. Honzátko, P. Vojtíšek, P. Navrátil, P. Peterka // *Proc. 5th EPS-QEOD Europhoton conf.*, 26–31 August 2012. – Stockholm, 2012.
8. Tm-Ho co-doped all-fiber broad-range self-sweeping laser around 1,9 μm / X. Wang, P. Zhou, X. Wang, H. Xiao, L. Si // *Opt. Express.* – 2013. – № 21. – P. 16290–16295.
9. Self-swept holmium-doped fiber laser near 2100 nm / J. Aubrecht, P. Peterka, P. Honzátko, P. Koška, O. Podrazky, F. Todorov, I. Kasik // *Lasers Congress.* – 2016. – Paper JTU2A.7.
10. Lobach I.A., Kablukov S.I. Application of a self-sweeping Yb-doped fiber laser for high-resolution characterization of phase-shifted FBGs // *J. Lightwave Technol.* – 2013. – № 31. – P. 2982–2987.
11. Femtosecond laser inscription of long-period fiber gratings in a polarization-maintaining fiber / A.A. Wolf, A.V. Dostovalov, I.A. Lobach, S.A. Babin // *J. Lightwave Technol.* – 2015. – № 33. – P. 5178–5183.
12. Исследование поляризационных свойств генерации второй гармоники в световодах с периодически наведенной квадратичной нелинейностью / Е.И. Донцова, И.А. Лобач, А.В. Достовалов, С.И. Каблуков // *Прикладная фотоника* – 2015. – Т. 2, № 4. – С. 342–357.

13. Ткаченко А.Ю., Лобач И.А. Устройство опроса волоконных сенсоров на базе волоконного лазера с самосканированием частоты // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 37–49.

14. Platt U., Stutz J. Differential absorption spectroscopy: principles and applications. – Berlin: Springer-Verland, 2008.

15. Study of the stimulated Brillouin scattering power threshold in high power double-clad fiber lasers / M.J. Hekmat, M.M. Dashtabi, S.R. Manavi, E. Hassanpour, R. Massudi // Laser Phys. – 2013. – № 23. – P. 025104.

16. Belgabad A.A., Bananej A., Eslami E. Comparison between threshold and sensitivity of stimulated Brillouin scattering at different pumping configurations in high-power double-clad fiber lasers // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. – 2015. – Vol. 126, iss. 24. – P. 4924–4928.

17. Lobach I.A., Tkachenko A.Yu., Kablukov S.I. Optimization and control of sweeping range in Yb-doped self-sweeping fiber laser // Laser Physics Letters. – 2016. – Vol. 13, № 4. – P. 045104.

18. Absolute distance measurement with micrometer accuracy using a Michelson interferometer and the iterative synthetic wavelength principle // K. Alzahrani, D. Burton, F. Lilley, M. Gdeisat, F. Bezombes, M. Qudeisat // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20. – P. 5658–5682.

19. Maru K. Axial scanning laser Doppler velocimeter using wavelength change without moving mechanism in sensor probe // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19. – P. 5960–5969.

20. Глебус В.С., Макаров С.Н. Волоконно-оптический виброметр на основе интерферометра Майкельсона // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – № 2. – С. 28–33.

21. Mode-field adaptor between large-mode-area fiber and single-mode fiber based on fiber tapering and thermally expanded core technique // X. Zhou, Z. Chen, H. Zhou, J. Hou // Appl. Opt. – 2014. – Vol. 53. – P. 5053–5057.

References

1. Hughes T.P., Young K.M. Mode sequences in ruby laser emission. *Nature*, 1962, no. 196, pp. 332–334.

2. Kir'yanov A.V., Il'ichev N.N. Self-induced laser line sweeping in an ytterbium fiber laser with nonresonant Fabry–Perot cavity. *Laser Physics Letters*, 2011, no. 8, pp. 305–312.

3. Lobach I.A., Babin S.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V. Broad-range self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser. *Optics Express*, 2011, no. 19, pp. 17632-17640
4. Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A. Self-scanned single-frequency operation of a fiber laser driven by a self-induced phase grating. *Laser Physics Letters*, 2014, no. 11, p. 045103.
5. Peterka P., Navratil P., Dussardier B., Slavik R., Honzatko P., Kubecek V. Self-induced laser line sweeping and self-pulsing in double-clad fiber lasers in fabry-perot and unidirectional ring cavities. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8433, p. 843309-1.
6. Lobach I.A., Kablukov S.I., Melkumov M.A., Khopin V.F., Babin S.A., Dianov E.M. Single-frequency Bismuth-doped fiber laser with quasi-continuous self-sweeping. *Optics Express*, 2015, no. 23, pp. 24833-24842.
7. Honzátka P., Vojtíšek P., Navrátil P., Peterka P. Self-induced laser line sweeping in tunable erbium-doped fiber laser. *Proceedings of the 5th EPS-QEOD Europhoton Conference, Stockholm, 26-31 August 2012*. Stockholm, 2012.
8. Wang X., Zhou P., Wang X., Xiao H., Si L. Tm-Ho co-doped all-fiber broad-range self-sweeping laser around 1.9 μm . *Optics Express*, 2013, no. 21, pp. 16290-16295.
9. Aubrecht J., Peterka P., Honzatko P., Koška P., Podrazky O., Todorov F., Kasik I. Self-swept holmium-doped fiber laser near 2100 nm. *Lasers Congress*, 2016, paper JTu2A.7.
10. Lobach I.A., Kablukov S.I. Application of a self-sweeping Yb-doped fiber laser for high-resolution characterization of phase-shifted FBGs. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, no. 31, pp. 2982-2987.
11. Wolf A.A., Dostovalov A.V., Lobach I.A., Babin S.A. Femtosecond laser inscription of long-period fiber gratings in a polarization-maintaining fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, no. 33, pp. 5178-5183.
12. Dontsova E.I., Lobach I.A., Dostovalov A.V., Kablukov S.I. Issledovanie polarizatsionnykh svoystv generatsii vtoroi garmoniki v svetovodakh s periodicheski navedennoi kvadratichnoi nelineinost'iu [Investigation of the polarization properties of second-harmonic generation in optical fibers with a periodically induced quadratic nonlinearity]. *Prikladnaia fotonika*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 342-357.

13. Tkachenko A.Iu., Lobach I.A. Ustroistvo oprosa volokonnykh sensorov na baze volokonnoho lazera s samoskanirovaniem chastoty [The interrogator of fiber sensors based on a self-scanning frequency fiber laser]. *Prikladnaia fotonika*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 37-49.

14. Platt U., Stutz J. Differential absorption spectroscopy: principles and applications. Berlin: Springer-Verland, 2008.

15. Hekmat M.J., Dashtabi M.M., Manavi S.R., Hassanpour E., Massudi R. Study of the stimulated Brillouin scattering power threshold in high power double-clad fiber lasers. *Laser Physics*, 2013, no. 23, p. 025104.

16. Belgabad A.A., Bananej A., Eslami E. Comparison between threshold and sensitivity of stimulated Brillouin scattering at different pumping configurations in high-power double-clad fiber lasers. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, vol. 126, iss. 24, pp. 4924-4928.

17. Lobach I.A., Tkachenko A.Yu., Kablukov S.I. Optimization and control of sweeping range in Yb-doped self-sweeping fiber laser. *Laser Physics Letters*, 2016, vol. 13, no. 4, p. 045104.

18. Alzahrani K., Burton D., Lilley F., Gdeisat M., Bezombes F., Qudeisat M. Absolute distance measurement with micrometer accuracy using a Michelson interferometer and the iterative synthetic wavelength principle. *Optics Express*, 2012, vol. 20, pp. 5658-5682.

19. Maru K. Axial scanning laser Doppler velocimeter using wavelength change without moving mechanism in sensor probe. *Optics Express*, 2011, vol. 19, pp. 5960-5969.

20. Glebus B.C., Makarov S.N. Volokonno-opticheskii vibrometr na osnove interferometra Maikel'sona [The fiber optic vibrometer based on Michelson interferometer]. *Interekspo Geo-Sibir'*, 2015, no. 2, pp. 28-33.

21. Zhou X., Chen Z., Zhou H., Hou J. Mode-field adaptor between large-mode-area fiber and single-mode fiber based on fiber tapering and thermally expanded core technique. *Applied Optics*, 2014, vol. 53, pp. 5053-5057.

Получено 09.12.2016