



УДК 535-45

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ВНЕШНЕГО РЕЗОНАТОРА С ВОЛОКОННОЙ РЕШЕТКОЙ БРЭГГА НА СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА С ВЕРТИКАЛЬНО ИЗЛУЧАЮЩИМ РЕЗОНАТОРОМ

В.А. Шулепов, С.М. Аксарин, В.Е. Стригалева

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Shulepov_Vladimir@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 23.11.18, принята к печати 25.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-15-20

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Шулепов В.А., Аксарин С.М., Стригалева В.Е. Влияние длины внешнего резонатора с волоконной решеткой Брэгга на спектр излучения лазера с вертикально излучающим резонатором // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 15-20. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-15-20

Аннотация

Предмет исследования. Исследовано влияние длины внешнего резонатора с волоконной брэгговской решеткой на спектр лазера с вертикально излучающим резонатором и центральной длиной волны излучения 1554 нм. Коэффициент отражения волоконной решетки Брэгга – 95 %, ширина спектра на полувысоте – 0,095 нм. **Метод.** С помощью интеррогатора снимались данные центральной длины волны излучения по времени, что позволило провести исследование путем оценки среднеквадратичного отклонения и дрейфа центральной длины волны излучения лазер с вертикальным резонатором как для случая с внешним резонатором на волоконной брэгговской решетке, так и без него. Длина внешнего резонатора в исследовании изменялась (с 1040 до 30 мм) путем уменьшения отрезка волокна от торца до решетки. **Основные результаты.** В результате исследования получена зависимость спектральных характеристик лазера от длины внешнего резонатора, также показана возможность уменьшения вариации центральной длины волны излучения более чем на порядок. Так, среднеквадратичное отклонение по уровню 3σ составило 0,17 пм с использованием внешнего резонатора длиной 1040 мм, в отличие от 8 пм без внешнего резонатора. Также показана возможность снижения амплитуды дрейфа центральной длины волны излучения в четыре раза, от 2 до 0,5 пм, при использовании внешнего резонатора. **Практическая значимость.** Проведенное исследование может оказаться полезным при создании волоконно-оптических распределенных датчиков физических величин доступной стоимости, в конструкции которых необходимо использовать высококогерентный источник излучения.

Ключевые слова

VCSEL с внешним резонатором, внешний резонатор на ВБР, волоконная решетка Брэгга, когерентный источник излучения, волоконно-оптический датчик

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №03.G25.31.0245).

EFFECT OF EXTERNAL CAVITY LENGTH WITH FIBER BRAGG GRATING ON SPECTRUM OF VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASER

V.A. Shulepov, S.M. Aksarin, V.E. Strigaleva

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Shulepov_Vladimir@mail.ru

Article info

Received 23.11.18, accepted 25.12.18

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-15-20

Article in Russian

For citation: Shulepov V.A., Aksarin S.M., Strigaleva V.E. Effect of external cavity length with fiber Bragg grating on spectrum of vertical cavity surface emitting laser. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 15–20 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-15-20

Abstract

Subject of research. The paper presents the study of effect that external cavity length with the fiber Bragg grating has on the spectrum of Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) with a central emission wavelength of 1554 nm. Fiber Bragg

grating reflection coefficient was 95 % and full width at half maximum (FWHM) was 0.095 nm. **Method.** An interrogator was used for emission central wavelength measurement over time. We performed the study of the standard deviation and drift of the VCSEL central wavelength, both with and without an external cavity. The studied external cavity length varied from 1040 to 30 mm by decreasing the fiber length. **Main results.** As a result of the study, the dependence of the VCSEL spectral characteristics on the external cavity length was obtained. It was also shown that the VCSEL center wavelength variation was reduced by more than an order of magnitude, so 3σ standard deviation was 0.17 pm using an external cavity 1040 mm long, in contrast to 8 pm for the case without an external cavity. We showed the possibility of reducing the amplitude of the central wavelength drift to one-fourth, from 2 to 0.5 pm, with the use of an external cavity. **Practical relevance.** The study proves to be useful when creating fiber-optic distributed sensors of physical quantities with affordable cost, if the design requires the use of a highly coherent emission source.

Keywords

external FBG VCSEL, FBG external cavity, fiber Bragg grating, narrowband light source, fiber optic sensor

Acknowledgements

This work was performed in ITMO University and was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No. 03.G25.31.0245)

Введение

На сегодняшний день лазер с вертикальным резонатором [1] – VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) – наиболее перспективен для использования в волоконно-оптических линиях связи по ряду причин. Во-первых, по сравнению с традиционными лазерными диодами с торцевым излучением, у VCSEL излучение выходит непосредственно через верхнюю поверхность, благодаря чему размеры массива диодов зависят лишь от размеров подложки, а это позволяет обеспечить низкую стоимость готового устройства. Во-вторых, VCSEL имеет малую активную область 150–200 нм [1], которая обеспечивает низкий пороговый ток и большой диапазон модуляции. Помимо этого, лазерный диод имеет резонатор длиной порядка нескольких микрометров, что позволяет излучать в одночастотном режиме. В-третьих, излучение VCSEL, поляризованное с коэффициентом экстинкции порядка 30 дБ, имеет круговую диаграмму направленности, что позволяет с высокой эффективностью согласовывать его с оптическим волокном [2, 3].

Такие лазеры активно используются в линиях связи, однако благодаря описанным выше преимуществам их можно использовать, в том числе, в качестве источника излучения в прецизионных волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиках [4]. Однако представленный тип лазера обладает и недостатками, основной из которых – чувствительность к обратным отражениям, несмотря на высокий коэффициент отражения верхнего зеркала резонатора, около 99,95 %. Результатом этого является переключение состояния поляризации на ортогональное, а также возникновение продольных мод, отличающихся от основной по длине волны, что приводит к ухудшению когерентных свойств излучения.

Изучению стабильности генерации лазеров посвящены работы [5, 6], в которых рассмотрены и выделены пять режимов работы лазера в зависимости от величины обратных отражений. Изучению особенностей лазеров типа DFB (Distributed Feedback Laser, с распределенной обратной связью) и DBR (Distributed Bragg Reflector Laser, с распределенным брэгговским отражателем) посвящены работы [7, 8], исследованию VCSEL с внешним резонатором на зеркале – работы [9, 10], а также ряд работ по исследованию VCSEL с внешним резонатором на волоконной брэгговской решетке (ВБР) [11, 12]. Несмотря на необходимость создания бюджетных одночастотных лазеров в указанных работах мало внимания уделено зависимости изменения спектральных характеристик VCSEL от длины внешнего резонатора на ВБР. Целью настоящей работы является установление этой зависимости.

Экспериментальная установка

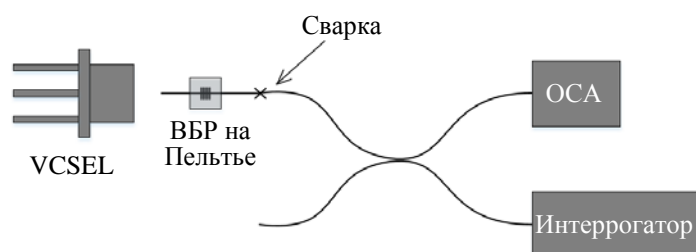


Рис. 1. Оптическая схема

Для проведения исследования была собрана оптическая схема, изображенная на рис. 1. Излучение от VCSEL при постоянном токе накачки вводилось в оптическое волокно с записанной в него ВБР. Благодаря тому что ВБР расположена на элементе Пельтье, возможно изменять силу обратной связи путем смещения спектра отражения решетки по длинам волн. Торцевое волокно имеет скос 8° для уменьшения влияния отражения Френеля на лазерный диод [13], расстояние между торцом волокна и кристаллом 50 мкм. Отрезок волокна с записанной ВБР ($R = 95\%$, $\Delta\lambda = 0,095$ нм), спектр которой представлен на рис. 2, соединен с одним

из плеч волоконно-оптического разветвителя путем сварки. К двум противоположным плечам разветвителя подключены измерительные устройства: интеррогатор Ibsen I-MON USB для слежения за центральной длиной волны излучения и оптический спектроанализатор (ОСА) Yokogawa AQ6370C для определения формы спектра излучения. ВБР записана интерферометрическим методом в анизотропное оптическое волокно с эллиптической напрягающей оболочкой с молярной концентрацией GeO_2 в сердцевине 18 % [14] (производство АО "Научно-исследовательского и технологического института оптического материаловедения Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»").

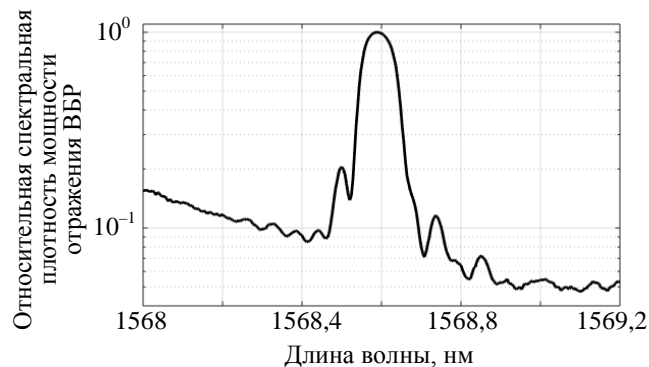


Рис. 2. Спектр отражения волоконной решетки Брэгга

Исследование спектральных характеристик VCSEL

Получен спектр излучения VCSEL с помощью ОСА (рис. 3). В спектре имеются два основных пика, которые поляризованы ортогонально (I и II) [15], однако при воздействии обратных отражений спектральный состав излучения перестает быть устойчивым и может изменяться.

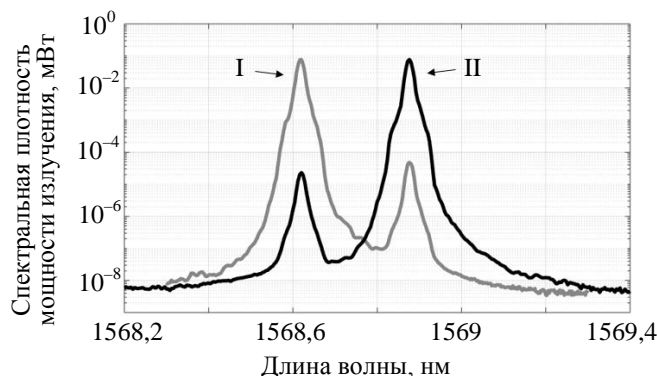


Рис. 3. Спектры излучения VCSEL

На основе ВБР сформирован внешний резонатор VCSEL, и для определения его оптимальной длины исследована зависимость спектральных характеристик лазера от расстояния до ВБР. Измерения с ВБР проводились на одном отрезке волокна, длина которого между VCSEL и решеткой постепенно сокращалась путем скалывания и последующей полировки торца под углом 8° для предотвращения попадания обратных отражений в излучающую область лазера. При каждой длине резонатора центральная длина волны отражения ВБР подстраивалась изменением температуры Пельтье для получения наилучшего значения среднего квадратичного отклонения (СКО). Это достигалось, когда центральная длина волны отражения решетки была немного смещена относительно центральной длины волны излучения VCSEL, таким образом, значение эффективного коэффициента отражения ВБР было меньше номинального значения отражения на центральной длине волны решетки. Для начальной длины отрезка 1040 мм получены значения центральной длины волны излучения от времени с помощью интеррогатора. Затем отрезок волокна до решетки укорачивался, и для каждой длины резонатора фиксировались данные, на основании которых оценивались величина СКО вариации центральной длины волны излучения лазера по уровню 3σ и дрейф центральной длины волны излучения.

На рис. 4 представлено изменение центральной длины волны излучения VCSEL во времени, где для сравнения приведены два случая: без внешнего резонатора (черный) и с внешним резонатором длиной 30 мм (белый). Видно, что спектр излучения VCSEL недостаточно устойчив во времени, СКО вариации центральной длины волны излучения по уровню 3σ для случая без внешнего резонатора составило порядка 6 пм, помимо этого сигнал имел дрейф с амплитудой около 2 пм.

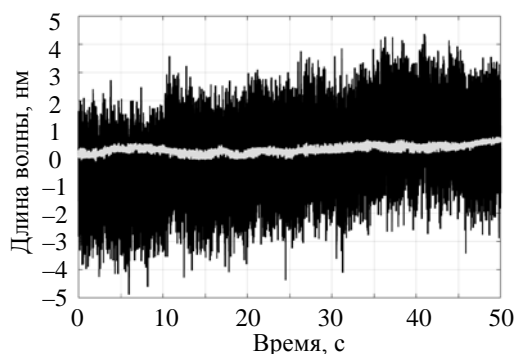


Рис. 4. Изменение центральной длины волны излучения VCSEL

При измерениях с внешним резонатором наблюдаются скачки моды – это перескоки центральной длины волны излучения на соседнюю продольную моду внешнего резонатора (рис. 5) [16].

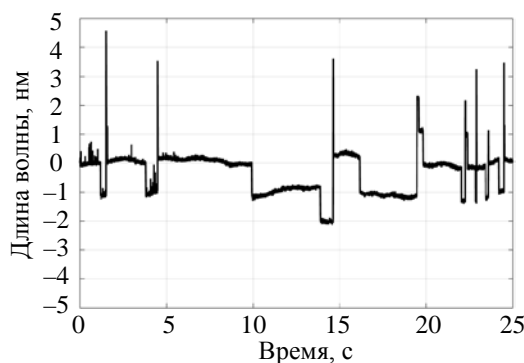


Рис. 5. Центральная длина волны излучения VCSEL (длина внешнего резонатора 720 мм)

Величина скачка моды определяется по формуле [16]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L}, \tag{1}$$

где λ – центральная длина волны излучения лазера, а L – оптическая длина внешнего резонатора.

Скачки моды возникают при малых изменениях длины резонатора за счет механических и тепловых микроколебаний торца волокна и, как следствие, установки новой оптической длины резонатора, удовлетворяющей условиям существования другой продольной моды.

При длине резонатора 320, 720 и 1050 мм не удается поддерживать одну длину волны излучения более 10 с за счет частого возникновения скачков мод. Уменьшение длины внешнего резонатора приводит к увеличению расстояния между продольными модами, в результате чего они перестают попадать в зону усиления, таким образом, длина волны для длины резонатора 30 и 150 мм поддерживается во время измерения, в нашем случае – 120 с.

Результаты исследования зависимости спектральных характеристик VCSEL от длины резонатора представлены на рис. 6, значения СКО вариации центральной длины волны излучения указаны без учета скачков мод.

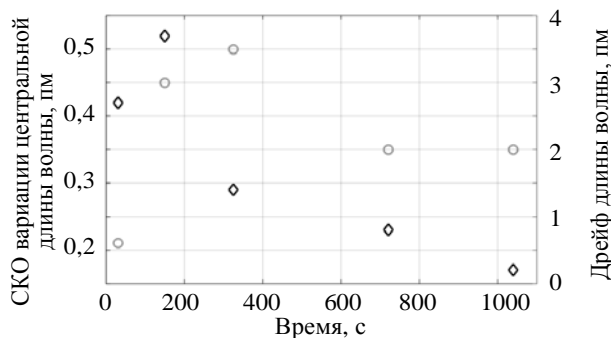


Рис. 6. СКО вариации (ромбы) и дрейф (окружности) центральной длины волны излучения VCSEL

Из рис. 6 видно, что использование внешнего резонатора позволяет уменьшить СКО вариации центральной длины волны на порядок, в сравнении со случаем без внешнего резонатора. На рисунке

видно уменьшение СКО вариации центральной длины волны излучения с увеличением длины резонатора, однако эта закономерность не сохраняется для наименьшей длины резонатора.

Заключение

Проведено исследование зависимости спектральных характеристик излучения VCSEL от длины внешнего резонатора на основе волоконной решетки Брэгга.

Получено, что при использовании волоконной решетки Брэгга с $R = 95\%$ и $\Delta\lambda = 0,095$ нм и длине резонатора 30 мм можно наблюдать стабильный спектр излучения со средними квадратичным отклонением вариации центральной длины волны излучения порядка 0,4 пм и амплитудой дрейфа порядка 0,5 пм. При этом в случае без внешнего резонатора среднее квадратичное отклонение составило порядка 8 пм, а амплитуда дрейфа порядка 2 пм. Помимо этого, с увеличением длины резонатора сокращается среднее квадратичное отклонение вариации центральной длины волны излучения, которое в лучшем случае (при длине внешнего резонатора 1040 мм) достигало 0,1–0,2 пм.

Результаты проведенного исследования могут быть полезны при создании волоконно-оптических распределенных датчиков, в конструкции которых необходимо использовать когерентные источники излучения.

Литература

- Mizunami T., Hamada T., Yamamoto T. External-fiber-grating vertical-cavity surface-emitting lasers // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2000. V. 12. N 11. P. 1558–1560. doi: 10.1109/68.887750
- Law J.Y., Agrawal G.P. Effects of optical feedback on static and dynamic characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers // *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 1997. V. 3. N 2. P. 353–358. doi: 10.1109/2944.605678
- Schwarz S. *Impact of Waveguide Input Coupling on Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes*. Wien, 2009. 99 p.
- Окоси Т., Окамото К. и др. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
- Donati S., Horng R.H. The diagram of feedback regimes revisited // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2013. V. 19. N 4. doi: 10.1109/jstqe.2012.2234445
- Tkach R.W., Chraplyvy A.R. Regimes of feedback effects in 1.5- μm distributed feedback lasers // *Journal of Lightwave Technology*. 1986. V. 4. N 11. P. 1655–1661. doi: 10.1109/jlt.1986.1074666
- Chung Y.C., Lee Y.H. Spectral characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers with external optical feedback // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1991. V. 3. N 7. P. 597–599. doi: 10.1109/68.87925
- Morton P.A., Mizrahi V., Tanbunek T. Stable single mode hybrid laser with high power and narrow linewidth // *Applied Physics Letters*. 1994. V. 64. N 20. P. 2634–2636. doi: 10.1063/1.111475
- Jiang S., Pan Z., Dagenais M., Morgan R.A., Kojima K. Influence of external optical feedback on threshold and spectral characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1994. V. 6. N 1. P. 34–36. doi: 10.1109/68.265881
- Hlaing H.M., Thomazy D.M., Viechinski B.J., Lin H. Linewidth narrowing caused by optical feedback in a multi-mode vertical-cavity surface-emitting laser // *Optics Communications*. 2006. V. 265. N 2. P. 580–584. doi: j.optcom.2006.03.032
- Mizunami T., Kojima S., Kudo T. A narrow-spectrum long-wavelength VCSEL using a fiber Bragg grating // *Proceedings of SPIE*. 2006. V. 6351. doi: 10.1117/12.691762
- Giudice G.E., Kuksenkov D.V., De Peralta L.G., Temkin H. Single-mode operation from an external cavity controlled vertical-cavity surface-emitting laser // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1999. V. 11. P. 1545–1547. doi: 10.1109/68.806841
- Lefevre H.C. *The Fiber-Optic Gyroscope*. 2nd ed. London: Artech House, 2014. 416 p.
- Gribov A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 12. P. 540. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3
- Moser P. Energy-Efficient VCSELs for Optical Interconnects.

References

- Mizunami T., Hamada T., Yamamoto T. External-fiber-grating vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 11, pp. 1558–1560. doi: 10.1109/68.887750
- Law J.Y., Agrawal G.P. Effects of optical feedback on static and dynamic characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, vol. 3, no. 2, pp. 353–358. doi: 10.1109/2944.605678
- Schwarz S. *Impact of Waveguide Input Coupling on Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes*. Wien, 2009, 99 p.
- Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisihara H., Kuma K., Hatate K. *Fiber-Optic Sensors*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990, 256 p. (in Russian)
- Donati S., Horng R.H. The diagram of feedback regimes revisited. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, vol. 19, no. 4. doi: 10.1109/jstqe.2012.2234445
- Tkach R.W., Chraplyvy A.R. Regimes of feedback effects in 1.5- μm distributed feedback lasers. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, vol. 4, no. 11, pp. 1655–1661. doi: 10.1109/jlt.1986.1074666
- Chung Y.C., Lee Y.H. Spectral characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers with external optical feedback. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, vol. 3, no. 7, pp. 597–599. doi: 10.1109/68.87925
- Morton P.A., Mizrahi V., Tanbunek T. Stable single mode hybrid laser with high power and narrow linewidth. *Applied Physics Letters*, 1994, vol. 64, no. 20, pp. 2634–2636. doi: 10.1063/1.111475
- Jiang S., Pan Z., Dagenais M., Morgan R.A., Kojima K. Influence of external optical feedback on threshold and spectral characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, vol. 6, no. 1, pp. 34–36. doi: 10.1109/68.265881
- Hlaing H.M., Thomazy D.M., Viechinski B.J., Lin H. Linewidth narrowing caused by optical feedback in a multi-mode vertical-cavity surface-emitting laser. *Optics Communications*, 2006, vol. 265, no. 2, pp. 580–584. doi: j.optcom.2006.03.032
- Mizunami T., Kojima S., Kudo T. A narrow-spectrum long-wavelength VCSEL using a fiber Bragg grating. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6351. doi: 10.1117/12.691762
- Giudice G.E., Kuksenkov D.V., De Peralta L.G., Temkin H. Single-mode operation from an external cavity controlled vertical-cavity surface-emitting laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, vol. 11, pp. 1545–1547. doi: 10.1109/68.806841
- Lefevre H.C. *The Fiber Optic Gyroscope*. 2nd ed. London, Artech House, 2014, 416 p.
- Gribov A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 12, pp. 540. doi: 10.1007/s11082-016-0816-3
- Moser P. *Energy-Efficient VCSELs for Optical Interconnects*.

Springer, 2016. 182 p. doi: 10.1007/978-3-319-24067-1
 16. Hashizume N., Nasu H. Mode hopping control and lasing wavelength stabilization // *Furukawa Review*. 2001. N 20. P. 7–10.

Springer, 2016, 182 p. doi: 10.1007/978-3-319-24067-1
 16. Hashizume N., Nasu H. Mode hopping control and lasing wavelength stabilization. *Furukawa Review*, 2001, no. 20, pp. 7–10.

Авторы

Шулепов Владимир Андреевич – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57191411190, ORCID ID: 0000-0003-2168-8046, Shulepov_Vladimir@mail.ru

Аксарин Станислав Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Scopus ID: 57191417852, ORCID ID: 0000-0002-7482-3072, staksar@gmail.com

Стригалев Владимир Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, Scopus ID: 6603225596, ORCID ID: 0000-0002-7151-9235, vstrglv@mail.ru

Authors

Vladimir A. Shulepov – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191411190, ORCID ID: 0000-0003-2168-8046, Shulepov_Vladimir@mail.ru

Stanislav M. Aksarin – PhD, Laboratory head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191417852, ORCID ID: 0000-0002-7482-3072, staksar@gmail.com

Vladimir E. Strigalev – PhD, Associate Professor, Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6603225596, ORCID ID: 0000-0002-7151-9235, vstrglv@mail.ru