ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

УДК 535.41

А.В. Князьков, В.А. Кукуричкин

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КОГЕРЕНТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

A.V. Kniazkov, V.A. Kukurichkin

St. Petersburg State Polytechnical University,
29 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

TEMPERATURE EFFECTS UPON COHERENCE OF SEMICONDUCTOR LASERS EMISSION

В статье приводятся результаты исследований влияния температурного фактора на когерентность излучения полупроводникового лазера красного диапазона и второй гармоники неодимого лазера зеленого диапазона с полупроводниковой лазерной накачкой для рабочего диапазона температур (20 – 40° С). Когерентность излучения оценивалась по морфологическим числам Эйлера картин интерференции. Обнаружена сильная зависимость контраста интерференционных картин от рабочей температуры излучающих лазеров. Даны рекомендации.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЛАЗЕР, НЕОДИМОВЫЙ ЛАЗЕР, КОГЕРЕНТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ, МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ ЧИСЛО ЭЙЛЕРА, КАРТИНА ИНТЕРФЕРЕНЦИИ, ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ.

The paper presents the study of thermal effects upon a semiconductor laser emission coherence for red radiation range and a diode-pumped Nd laser operating on second harmonic of green radiation range for operating temperatures (20 – 40° C). The coherence of the radiation was estimated by morphological Euler numbers of the interference patterns. A strong dependence of the interference patterns contrast on the operating temperature of emitting lasers was detected. Recommendations were given.

SEMICONDUCTOR LASER, NEODIM LASER, COHERENCE RADIATION, MORPHOLOGICAL EULER NUMBER, INTERFERENCE PATTERNS, THERMAL EFFECTS.

Полупроводниковые лазеры находят все более широкое применение в измерительных системах, системах оптической обработки информации, в оптических вычислительных устройствах и голографических исследованиях. Применения полупроводниковых лазеров и твердотельных с диодной накачкой в когерентно-оптических устройствах ограничены из-за довольно небольшой длины когерентности излучения этих лазеров (сантиметры) и в связи с ее сильной зависимостью от внешних факторов, таких как ток накачки и температуры рабочего тела и резонатора. Интерферометрия относится к одной из важных областей применения источников когерентного излучения. Оценка минимальной длины когерентности оптического излучения для формирования однородной картины интерференции наиболее полно дана в работе [1]. Для повышения когерентности излучения используют, как правило, резонаторы

Фабри – Перо. Анализ модовой структуры прямоугольного резонатора полупроводникового лазера показал, что она существенно отличается от спектра мод резонатора Фабри – Перо [2]. Методам экспериментального определения когерентности полупроводниковых лазеров посвящены работы [3, 4].

В работе [5] были обнаружены периодические колебания мощности излучения одночастотного газоразрядного гелий-неонового лазера повышенной мощности с внутренним резонатором Фабри – Перо во время самопрогрева, при этом степень когерентности излучения не исследовалась. Спектральные характеристики излучения инжекционного полупроводникового лазера и второй гармоники неодимого лазера с полупроводниковой лазерной накачкой при переходе от одной моды к другой исследовались в работе [6]. При этом изучались зависимости степени когерентности излучения только от тока накачки, и влияние температуры не рассматривалось. В работе [7] представлены исследования температурной чувствительности мощности излучения полупроводниковых лазеров на квантовых ямах. Недавно появилась статья об одночастотном режиме работы лазерных диодов [8]. Авторы провели спектральное исследование существования области генерации одночастотного режима в зависимости от тока накачки и температуры.

Настоящая работа посвящена исследованиям влияния температуры на когерентность излучения широко используемых полупроводниковых лазеров красного диапазона и второй гармоники неодимого лазера зеленого диапазона с полупроводниковой лазерной накачкой при оптимальном токе последней. Измерение степени когерентности излучения лазеров проводились с помощью модифицированного интерферометра МИИ-4. Установка представляла собой интерферометр Майкельсона с равными плечами, т. е. измерения проводились при нулевой разности фаз интерферирующих пучков $\Delta d = d_2 - d_1 - d_3 = 0$ (рис. 1). Степень когерентности обычно оценивается по кривой видности картины интерференции при изменении разности длин плеч. Мы ее оценивали по количеству светлых пятен, покрывающих картину интерференции и превышающих заданный уровень интенсивности. Количество этих спекл-пятен зависит от контраста спекл-картины, который определяется степенью когерентности излучения. Если степень когерентности зависит от температуры рабочего тела и резонатора лазера, то и число таких пятен будет изменяться. Именно таким связям и зависимостям посвящена данная статья.

Полупроводниковые лазеры отличаются повышенной чувствительностью к внешним факторам, таким как температура и ток накачки. Температура изменяет показатель преломления кристалла, ширину его запрещенной зоны и инжекционный ток, а также она влияет на геометрические размеры резонатора лазера. Влияние выражается, прежде всего, в уровне излучаемой мощности и степени когерентности излучения. Полоса длин волн усиливаемых колебаний в полупроводниковом лазере достаточно широка. Но генерация возникает лишь на тех типах колебаний, длина волны которых близка к линии максимума полосы усиления λ_0 при выполнении условий пороговой

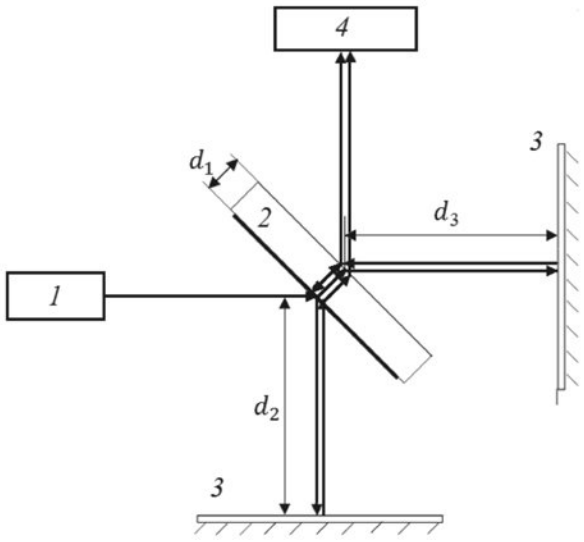

Рис. 1. Схема экспериментальной установки (интерферометр Майкельсона):
1 – лазер, *2* – полупрозрачное зеркало, *3* – плоское зеркало, *4* – CCD-камера, d_1 – толщина зеркала *2*; d_2, d_3 – длины плеч интерферометра

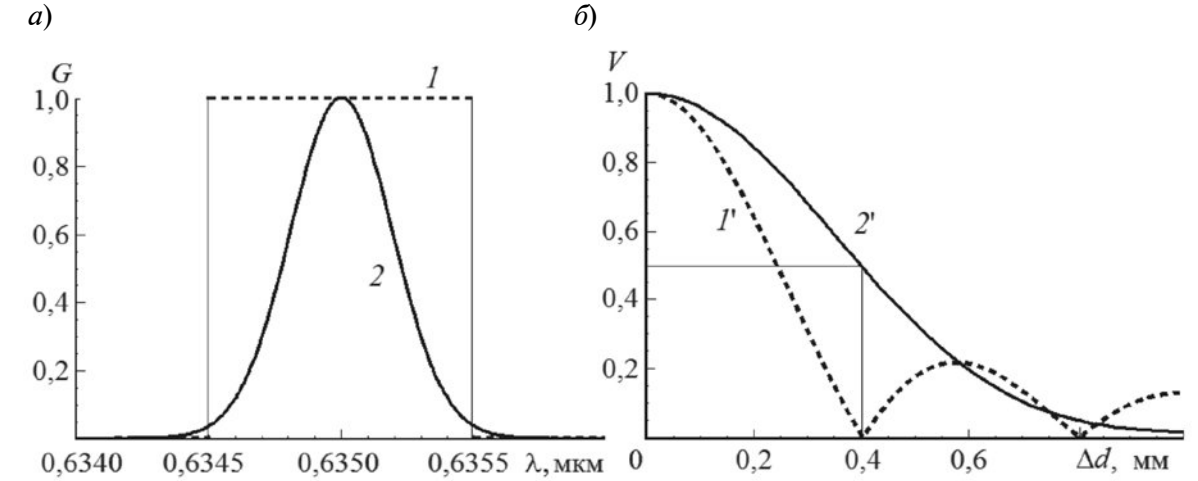

Рис. 2. Прямоугольный (*1*) и гауссовский (*2*) спектры лазерного излучения (*а*), а также полученные для них зависимости видности *V* картины интерференции от разности фаз Δd интерферирующих пучков (*б*);
для прямоугольного (*1*') и гауссовского (*2*') спектров λ_0 = 635 нм, $\Delta\lambda$ = 1 нм

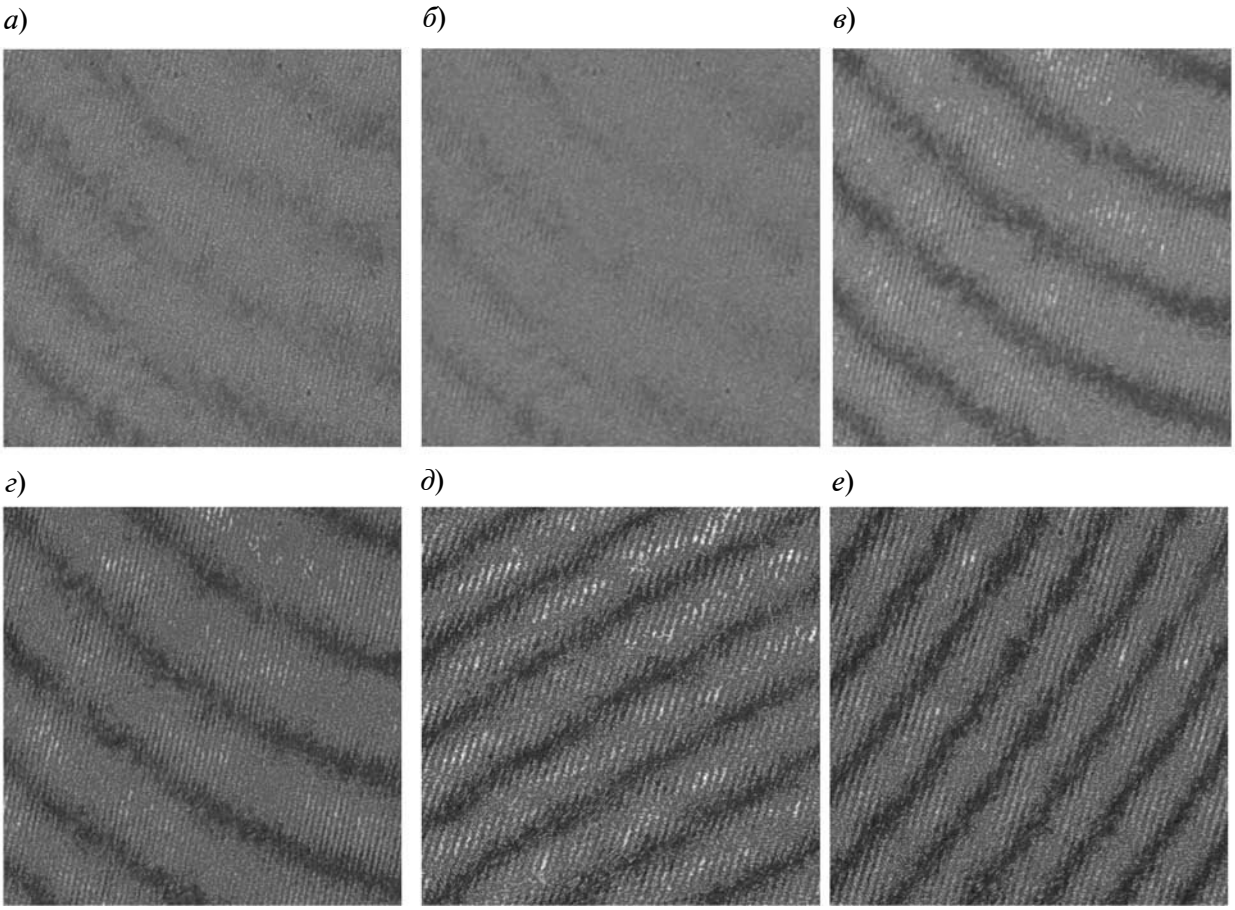

Рис. 3. Изменение картины интерференции равных по интенсивности пучков (при нулевой разности фазовых задержек) от температуры резонатора лазера LD-63104TL;
значения температуры, °С: 36,0 (*а*), 35,0 (*б*), 31,3 (*в*), 30,0 (*г*), 28,0 (*д*), 25,5 (*е*)

генерации. Температура может смещать линию усиления, вызывая так называемый эффект «перескока» генерируемых мод. Этот эффект в полупроводниковых лазерах хорошо известен, особенно он проявляется при малом числе генерируемых мод, и наблюдается как шум «перескока» моды [9, 10].

Основной характеристикой когерентности излучения является степень когерентности γ. Зависимость модуля степени когерентности $|\gamma(\Delta d)|$ излучения от разности фаз интерферирующих пучков Δd соответствует поведению видности интерференционной картины $V(\Delta d)$ и для равных интенсивностей интерферирующих пучков определяется выражением

$$\left|\gamma(\Delta d)\right| = V(\Delta d) = \frac{I_{\max}(\Delta d) - I_{\min}(\Delta d)}{I_{\max}(\Delta d) + I_{\min}(\Delta d)}, \quad (1)$$

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ – соответствующие экстремумы интенсивности интерференционной картины.

По кривой видности находится длина когерентности L_{cog} излучения, которая обусловлена шириной спектра генерируемых длин волн источника Δλ. Для прямоугольной аппроксимации спектра генерации $G(\lambda)$ (рис. 2, *а*) длина когерентности L_{cog}, определяемая по первому минимуму кривой видности, связана простым соотношением с центральной длиной волны спектра источника λ_0:

$$L_{cog} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}. \quad (2)$$

Можно показать, что в случае гауссовской аппроксимации спектра генерации источника-лазера $G(\lambda)$ длина когерентности L_{cog}, которая подчиняется выражению (2) и соответствует такой же ширине прямоугольного спектра Δλ, будет определяться по

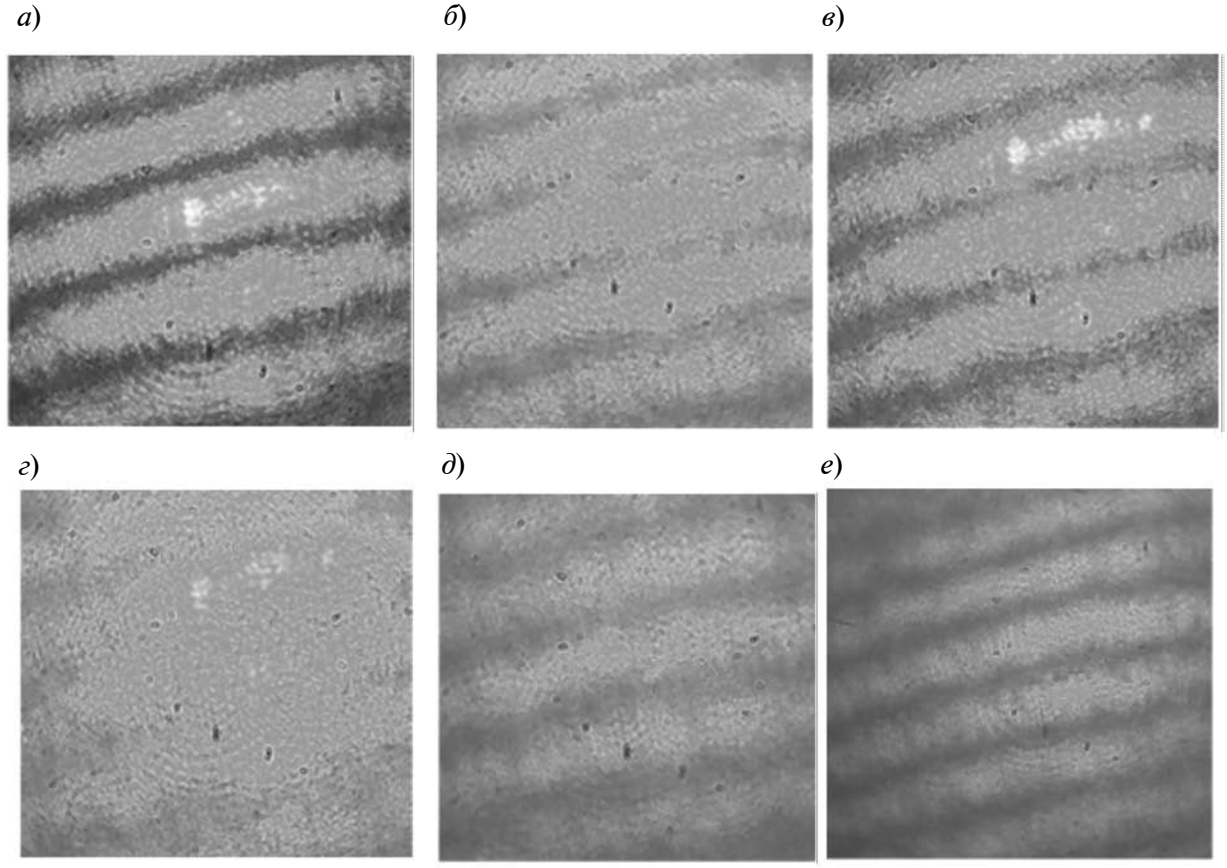

Рис. 4. Изменение картины интерференции равных по интенсивности пучков (при нулевой разности фазовых задержек) от температуры резонатора лазерного модуля S10; значения температуры, °С: 24,1 (*а*), 28,4 (*б*), 29,8 (*в*), 31,3 (*г*), 34,7 (*д*), 36,6 (*е*)

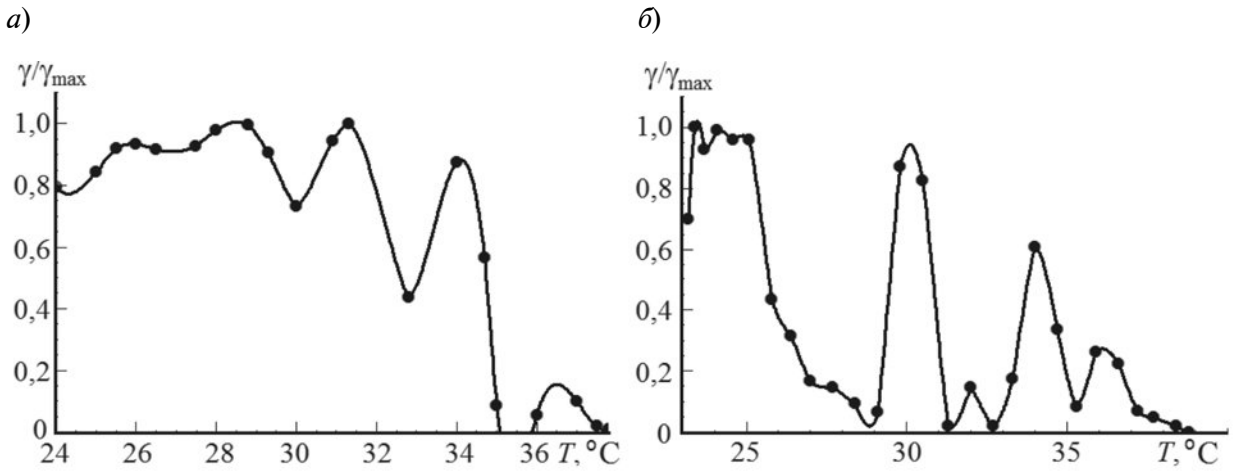

Рис. 5. Температурные зависимости относительной степени когерентности двух лазеров: *а* – LD-63104TL (λ = 635 нм), *б* – S10 (λ = 532 нм)

уровню 0,5 кривой видности (рис. 2, *б*).

Зависимость относительной степени когерентности излучения полупроводникового лазера от температуры его корпуса была продемонстрирована нами в работе [11] на примере излучения лазерного диода LD-63104TL (λ = 635 нм). Температурный нагрев осуществлялся с помощью ячейки Пельтье. Измерения проводились в квазистационарных условиях. Каждую минуту регистрировались картины интерференции в режиме остывания лазера со скоростью 0,1 град/мин (рис. 3). Пространственный период картин интерференции соответствовал небольшому числу полос интерферометра Майкельсона; по ним можно было достоверно рассчитать контраст видности классическим методом по формуле (1).

Были также проведены исследования когерентности излучения лазерного модуля S10 (λ = 532 нм), работающего на второй гармонике неодимого лазера с полупроводниковой лазерной накачкой (рис. 4).

Обычно видность картины интерференции, по которой рассчитывается степень когерентности излучения, оценивается по контрасту полос интерференционной картины. В настоящей работе степень когерентности оценивалась по контрасту спекл-картины двух интерферирующих квазиплоских волн, отражающему степень когерентности излучения [12]. Изменение среднего уровня отсчета освещенности пятен спеклов вызывает изменение их количества на единицу площади [13]. Интерференционная картина обрабатывалась по всей апертуре, и для подсчета светлых пятен спеклов рассчитывались морфологические числа Эйлера по соответствующему уровню. Уровень расчета выбирался так, чтобы указанные числа отражали пропорциональность контрасту интерференционных полос или длине (степени) когерентности излучения. Числа Эйлера рассчитывались для всех картин интерференции при помощи функции MorphologicalEulerNumber[image, τ] из пакета Вольфрам Математика. Средний уровень их расчета τ был равен 0,40 для лазера LD-63104TL (λ = 635 нм) и 0,65 для лазерного модуля S10 (λ = 532 нм).

Типичные интерполяционные кривые температурной зависимости относительного модуля степени когерентности γ/γ_{max} лазерного диода LD-63104TL и лазерного модуля S10 показаны на рис. 5. Относительная погрешность измерений не превышала 10 %.

Полученные экспериментальные данные указывают на сильную немонотонную зависимость степени когерентности от рабочей температуры резонатора полупроводниковых лазеров. Это является проявлением нестабильности спектрального состава генерируемых мод, связанного с

эффектом перескока генерируемых мод при температурной деформации резонатора лазера, который проявляется особенно ярко в маломодовых лазерах [8]. Представленные в статье исследования указывают на необходимость термостабилизации резонаторов полупроводниковых лазеров, предназначенных для прецизионных научных измерений, с целью достижения максимальной когерентности излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бакут П.А., Мандросов П.А.** Оценка минимальной длины когерентности зондирующего оптического излучения в интерферометрии // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 1. С. 81–84.

2. **Батрак Д.В., Богатов А.П., Дракин А.Е., Дьячков Н.В., Мифтахутдинов Д.Р.** Моды полупроводникового прямоугольного микрорезонатора // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 1. С. 16–22.

3. **Захаров Ю.Н.** Модовая структура излучения полупроводниковых лазеров: контроль, управление и применение // «Физика наукоемких технологий». Иркутск: ИВВАУ, 2006. С. 108–119.

4. **Захаров Ю.Н.** Применимость полупроводниковых лазеров в научно-технической и изобразительной голографии // «Голография в России и зарубежом. Наука и практика». Сб. трудов научно-практической конференции. М.: ООО «Голография-сервиз». 2007. С. 50–54.

5. **Борисовский С.П., Керносов М.Ю., Степанов В.А., Чуляева Е.Г.** Исследование свойств лазерного излучения одночастотного лазера повышенной мощности // Вестник РГРТА. 2007. № 20. С. 99–103.

6. **Пахалов В.Б.** Спектральные моды и когерентность полупроводникового лазера и Nd-лазера с диодной накачкой вблизи порога генерации // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 8. С. 14–22.

7. **O`Gorman J., Levi A. F. J., Schmitt-Rink S., Tanbun-Ek T., Coblentz D.L., Logan R.A.** On the temperature sensitivity of semiconductor lasers. // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 60. № 2. P. 157–159.

8. **Дворцов Д.В., Парфенов В.А.** Одночастотный режим работы лазерных диодов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2012. № 1(141). С. 82–86.

9. **Petermann K.** Laser diode modulation and noise. Dordrecht: Springer, 1988. 327 p.

10. **Белкин М.Е.** Компоненты волоконно-оптических систем. Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. гос. ин-та радиотехники, электроники и автоматики, 2010. 112 с.

11. **Кукуричкин В.А., Князьков А.В.** Исследование температурной зависимости когерентности излучения полупроводниковых лазеров, применяемых в оптической диагностике // XLI Неделя науки СПбГПУ: Сб. трудов. Материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. II. Ч. XX. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 65–66.

12. **Dandliker R., Mottier F.M.** Determination of coherence length from speckle contrast on a rough surface // Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Physik. 1971. Vol. 22. P. 369–381.

13. **Лопес Л.М.** К определению поперечного размера спеклов // ЖТФ. 1991. Т. 61. № 8. С. 144–148.

REFERENCES

1. **Bakut P.A., Mandrosov P.A.** Otsenka minimal'noi dliny kogerentnosti zondiruiushchego opticheskogo izlucheniia v interferometrii. *Quantum Electronics*, 2007, Vol. 37, No. 1, pp. 81–84. (rus)

2. **Batrak D.V., Bogatov A.P., Drakin A.E., D'iachkov N.V.** Miftakhutdinov D.R. Mody poluprovodnikovogo priamougol'nogo mikrorezonatora. *Quantum Electronics*, 2008, Vol. 38, No. 1, pp. 16–22. (rus)

3. **Zakharov Yu.N.** Modovaia struktura izlucheniia poluprovodnikovykh lazerov: kontrol', upravlenie i primenenie. *Fizika naukoemkikh tekhnologii*. Irkutsk, 2006, pp. 108–119. (rus)

4. **Zakharov Yu.N.** Primenimost' poluprovodnikovykh lazerov v nauchno-tekhnicheskoi i izobrazitel'noi golografii. Golografiia v Rossii i zarubezhom. Nauka i praktika. Moscow, OOO "Golografiia-serviz", 2007. Pp. 50–54. (rus)

5. **Borisovskii C.P., Kernosov M.Yu., Stepanov V.A., Chuliaeva E.G.** Issledovanie svoistv lazernogo izlucheniia odnochastotnogo lazera povyshennoi moshchnosti. *Vestnik RGRTA*, 2007, No. 20, pp. 99–103. (rus)

6. **Pakhalov V.B.** Spektral'nye mody i kogerentnost' poluprovodnikovogo lazera i Nd-lazera s diodnoi nakachkoi vblizi poroga generatsii. *Technical Physics Letters*, 2010, Vol. 36, No. 8, pp.14–22. (rus)

7. **O`Gorman J., Levi A.F.J., Schmitt-Rink S., Tanbun-Ek T., Coblentz D.L., Logan R.A.** On the temperature sensitivity of semiconductor lasers. *Appl.*

Phys. Lett., 1992, Vol. 60, No. 2, pp. 157–159.

8. **Dvortsov D.V., Parfenov V.A.** Odnochastotnyi rezhim raboty lazernykh diodov. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics.* 2012, No. 1(141), pp. 82–86. (rus)

9. **Petermann K.** Laser Diode Modulation and Noise. Springer, 1988. 327 p.

10. **Belkin M.E.** Komponenty volokonno-opticheskikh system. Moscow, 2010. 112 p. (rus)

11. **Kukurichkin V.A., Kniaz'kov A.V.** Issledovanie temperaturnoi zavisimosti kogerentnosti izlucheniia poluprovodnikovykh lazerov, primeniaemykh v opticheskoi diagnostike. XLI Nedelia nauki SPbGPU: Sb. trudov. Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Ch. II. Ch. KhKh. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012, pp. 65–66. (rus)

12. **Dandliker R., Mottier F.M.** Determination of Coherence Length from Speckle Contrast on a Rough Surface. *Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Physik*. 1971, Vol. 22, pp. 369–381.

13. **Lopes L.M.** K opredeleniiu poperechnogo razmera speklov. Technical *Physics*, 1991, Vol. 61, No. 8, pp. 144–148. (rus)

КНЯЗЬКОВ Анатолий Викторович – *доктор физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

akniazkov@mail.ru

КУКУРИЧКИН Владимир Александрович – *студент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.*

195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2013