

УДК 53.097

**СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ДИОДНЫХ ЛАЗЕРОВ
С ПОМОЩЬЮ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ИЗ ТАНТАЛАТА
ЛИТИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
РУБИДИЕВОГО ФОНТАНА**

В.И. Павлов, И.В. Балакирева, М.К. Бражников, Н.П. Хатырев

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
pavlov_v@vniiftri.ru*

Аннотация. В работе реализовано затягивание многочастотного диодного лазера с центральной длиной волны излучения 1,5 мкм микрорезонатором из tantalата лития с измеренной добротностью 0,9 · 10⁸. Измеренный электрооптический коэффициент для микрорезонатора толщиной 1 мм и диаметром 3 мм составил $\delta f/\delta U \approx 13,2 \text{ МГц/В}$, который хорошо согласуется с теоретической оценкой и проведённым нами численным моделированием. Также была экспериментально измерена область стабилизации частоты $\Delta\Omega_{\text{exp}} \approx 350 \text{ МГц}$ и произведена оценка ширины линии $\Delta\nu_{\text{est}} \approx 10^4 \text{ Гц}$ в режиме затягивания.

Ключевые слова: оптические микрорезонаторы, электрооптический эффект, стабилизация частоты.

**FREQUENCY STABILIZATION OF DIODE LASERS USING
LITHIUM TANTALATE MICRORESONATORS FOR LASER
COOLING SYSTEMS OF A RUBIDIUM FOUNTAIN**

V.I. Pavlov, I.V. Balakireva, M.K. Brazhnikov, N.P. Khatyrev

*FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,
pavlov_v@vniiftri.ru*

Annotation. In this work, a multifrequency diode laser with a central emission wavelength of 1.5 μm is self-injection locked by a lithium tantalate microresonator with a measured quality factor of $0.9 \cdot 10^8$. The measured electro-optic coefficient for a microresonator with 1 mm thick and 3 mm diameter was $\delta f/\delta U \approx 13.2 \text{ MHz/V}$, which is in good agreement with the theoretical estimate and our numerical simulation. We also experimentally measured the frequency stabilization region $\Delta\Omega_{\text{exp}} \approx 350 \text{ MHz}$ and estimated the linewidth $\Delta\nu_{\text{est}} \approx 10^4 \text{ Hz}$ in the self-injection locking mode.

Keywords: optical microresonators, electro-optical effect, frequency stabilization.

Введение

В современной науке и технике существует потребность в стабильных лазерах с наиболее узкой шириной спектра излучения. В частности, в таких областях, как метрология, спектроскопия высокого разрешения, оптические датчики и атомные часы, когерентные системы передачи информации, космический мониторинг парниковых газов [1] и др. Например, в системах лазерного

охлаждения рубидиевых стандартов частоты фонтанного типа необходимы лазеры шириной линии порядка 1 кГц и возможностью быстрой подстройки частоты для осуществления эффективной привязки к рубидиевой ячейке. Элементная база фотоники хорошо развита в телекоммуникационном диапазоне длин волн в окрестности длины волны 1550 нм. В этой области, в частности, доступны эффективные малошумящие оптические усилители. В то же время большинство атомных переходов, используемых в стандартах частоты, лежат в видимом диапазоне или в более коротковолновой части ближнего ИК-диапазона. Удачным решением систем лазерного охлаждения, сочетающим преимущества коммерчески доступных ИК-компонентов с требованием работы в коротковолновой области оптического спектра, является способ построения систем лазерного охлаждения на основе схем с генерацией второй гармоники.

Наиболее распространённым типом лазеров являются полупроводниковые лазеры. Однако ширина линии излучения таких лазеров обычно слишком велика для многих приложений. Одним из методов стабилизации и сужения ширины спектра излучения лазера является привязка к высокодобротному резонатору. Простым и эффективным способом привязки является затягивание частоты с использованием микрорезонаторов с модами «шепчущей галереи», которое реализовано в данной работе. В основе метода затягивания лежит явление обратного рэлеевского рассеяния на внутренних и поверхностных неоднородностях микрорезонатора [2]. В результате рассеяния возникает обратная волна на собственной частоте микрорезонатора, которая может попасть в лазерный диод. Внутри резонатора Фабри — Перо лазерного диода она вытесняет все другие колебания и вынуждает лазер излучать на собственной частоте микрорезонатора. Такая стабилизация не только затягивает частоту генерации к частоте микрорезонатора, но также уменьшает флуктуации частоты в стабилизированном лазере по сравнению с флуктуациями частоты в свободном режиме, сужая спектральную ширину генерируемого излучения [3]. В [4] экспериментально было продемонстрировано улучшение шумовых характеристик лазера с затягиванием частоты. Несмотря на то, что ширина спектральной линии полупроводникового лазера ограничена фундаментальным пределом Шавлова — Таунса, на практике предельная ширина линии излучения определяется механическими или тепловыми эффектами [5, 6].

Метод реализации затягивания частоты

Для получения затягивания частоты была собрана установка, изображённая на рис. 1. В эксперименте использовался микрорезонатор из танталата лития. Толщина кристалла составляла 1 мм, диаметр — 3 мм. В качестве источника излучения использовался многочастотный лазерный диод с центральной длиной волны излучения 1,5 мкм, который был связан с микрорезонатором.

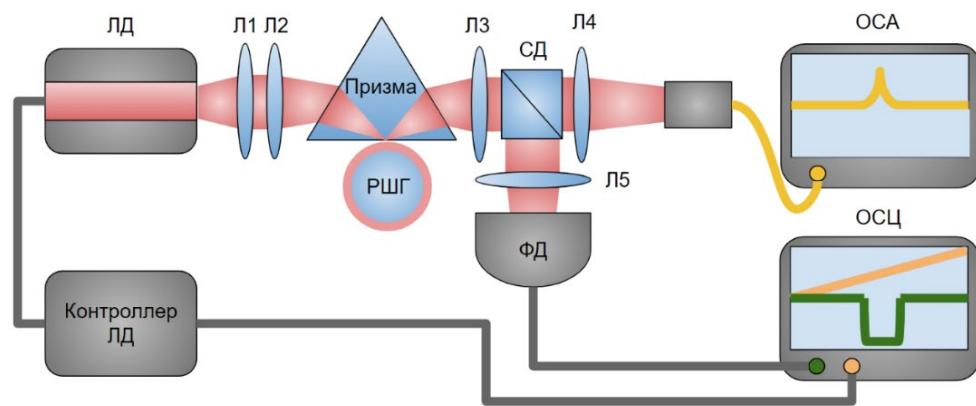


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ЛД — многочастотный лазерный диод на 1,5 мкм; контроллер ЛД — блок управления лазерным диодом; призма — рутиловая призма (TiO₂), $n_0 = 2,45$, $n_e = 2,7$; РШГ — микрорезонатор с модами «шепчущей галереи» из танталата лития; Л1, Л2, Л3, Л4, Л5 — линзы; СД — делитель лазерного пучка; ФД — фотодетектор; ОСЦ — двухканальный осциллограф: жёлтый канал — управляющий сигнал линейной перестройки диодного лазера током, зелёный — сигнал с фотодетектора; ОСА — оптический спектроанализатор

Детектирование затягивания осуществлялось с помощью осциллографа, измеряя фотодетектором изменение интенсивности излучения после линзы Л5 (см. рис. 1) при перестройке частоты лазерного диода. В режиме затягивания, при линейной перестройке частоты лазерного диода, вместо лоренцевских резонансов наблюдаются прямоугольные и треугольные провалы (в зависимости от фазы обратной волны), изображённые на рис. 2. Это объясняется тем, что в результате действия оптической обратной связи частота лазера не меняется в некотором диапазоне при линейной перестройке лазера и остаётся равной собственной частоте микрорезонатора.

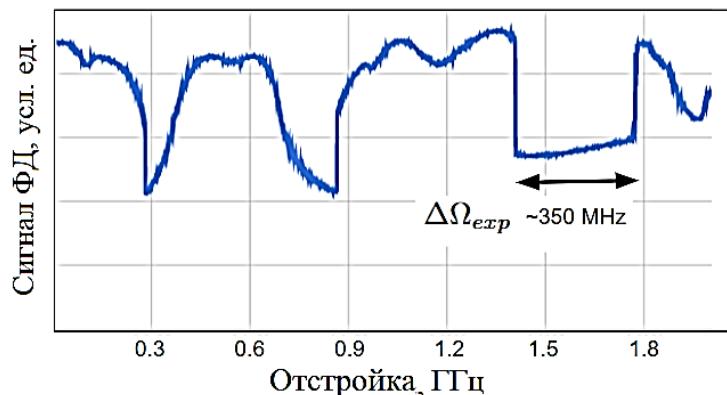


Рис. 2. Интенсивность выходного сигнала на экране осциллографа при перестройке лазера с помощью тока

В большинстве экспериментов с затягиванием используются лазерные диоды с распределённой обратной связью (DFB), ширина линии которых обычно составляет несколько МГц, и излучают они в одномодовом режиме. Обычный многочастотный диод имеет более сложную структуру спектра. Спектр диодного лазера, используемого в данной работе, изображён на рис. 3а.

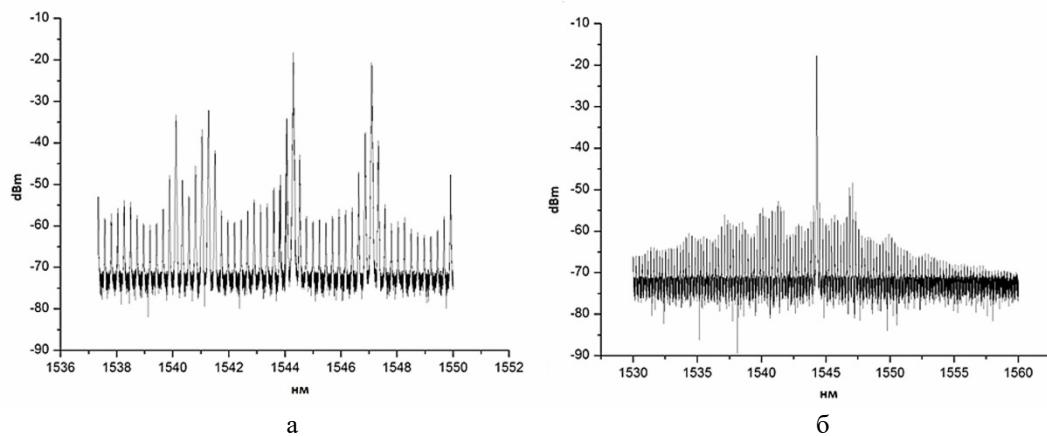


Рис. 3. Данные, полученные с оптического спектроанализатора:
а — спектр многочастотного лазерного диода; б — спектр лазерного диода с частотой, затянутой микрорезонатором

При настройке на горизонтальный участок провала $\Delta\Omega_{\text{exp}}$ (см. рис. 2) происходит подавление не попавших в резонанс мод лазерного диода, и частота системы «лазер — микрорезонатор» стабилизируется, что видно на рис. 3б.

Оптимизация связи

Для получения эффекта затягивания необходимо было подобрать угол падения лазерного излучения на грань призмы, при котором происходит наиболее эффективное возбуждение мод. Для некоторых материалов экспериментальное значение угла не совпадает с теоретическим, и максимальная эффективность связи наблюдается для других углов. В данной работе была измерена зависимость эффективности связи для разных углов. Угол отсчитывался от нормали к грани призмы. Экспериментальный максимум эффективности связи отличается от теоретически рассчитанных значений углов по формуле:

$$\varphi = \arcsin(n_p \sin(\arcsin(n_r / n_p) - 45)), \quad (1)$$

где n_p — показатель преломления призмы; n_r — показатель преломления резонатора. Для рутиловой призмы и резонатора из танталата лития $\varphi_{TE} = 21$ и $\varphi_{TM} = 43$.

Измерение добротности

Чем выше добротность резонатора, тем больше область затягивания, следовательно, важной частью эксперимента являлось получение максимальной добротности. Так как существует ограничение на максимальную добротность, связанное в основном с потерями на рассеянии и поглощении, добротность для излучения 1,5 мкм получается выше, чем на 0,8 мкм, поэтому результаты с использованием многочастотных диодов с длиной волны 0,8 мкм получились значительно хуже. Другим значительным вкладом в добротность является шероховатость боковой поверхности микрорезонатора. Повышение добротности осуществлялось с помощью механической полировки алмазными суспензиями боковой поверхности микрорезонатора.

Для измерения добротности была собрана экспериментальная установка, изображённая на рис. 4. Измерение добротности осуществлялось с помощью фазовой модуляции лазерного излучения на частоте $\Omega_{\text{mod}} = 20$ МГц с амплитудой напряжения 1,5 В. В спектре появлялись боковые пики, отстроенные на частоту модуляции, что позволило измерить добротность микрорезонатора в соответствии с формулой:

$$Q_{\text{exp}} = \frac{v\Delta t}{\Omega_{\text{mod}}\Delta v_m}, \quad (2)$$

где Δt — расстояние до бокового пика; Δv_m — полная ширина на половине высоты пика; $v = 1,92 \cdot 10^{14}$ — частота излучения лазера. Так как измерялась зависимость интенсивности излучения от частоты, для оценки добротности измерялась полная ширина резонансной кривой на половине высоты. В результате максимальная измеренная добротность TE -моды — $Q_{\text{exp}} = 0,9 \cdot 10^8$.

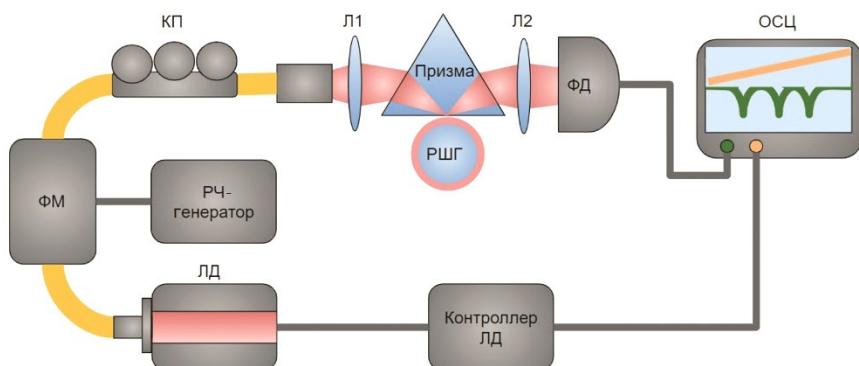


Рис. 4. Установка для измерения добротности: ЛД — диодный лазер с волоконным выходом, излучающий на длине волны 1,5 мкм и шириной линии \ll ширины резонанса микрорезонатора; контроллер ЛД — блок управления лазерным диодом; ФМ — электрооптический фазовый модулятор; Л1, Л2 — линзы; КП — волоконный контроллер поляризации; призма — рутиловая призма; РЧ-генератор — радиочастотный генератор; РШГ — микрорезонатор из LiTaO₃; ФД — фотодетектор; ОСЦ — осциллограф

Оценка ширины линии

Так как многочастотный диодный лазер обладает сложным спектром, состоящим из нескольких пиков, измерение с помощью гетероденирования оказалось технически сложным. Поэтому на данном этапе мы ограничились лишь теоретической оценкой ширины линии с использованием экспериментальных данных. Наиболее точное описание динамики затягивания продемонстрировано в статье [7], где было получено выражение для ширины спектра затянутого лазера:

$$\frac{\Delta v}{\Delta v_{free}} = \frac{Q_d^2}{Q_m^2} \frac{1}{16\Gamma_m^2(1+\alpha_g^2)}, \quad (3)$$

где Δv и Δv_{free} — ширина линии затянутого и свободного режимов излучения соответственно; Γ_m — коэффициент отражения от микрорезонатора; α_g — коэффициент усиления и области стабилизации $\Delta\Omega$:

$$\frac{\Delta\Omega}{\Delta v_{free}} = \sqrt{1 + \alpha_g^2} \frac{\Gamma_m}{Q_d}. \quad (4)$$

В результате ширина линии $\Delta v_{est} \approx 10^4$ Hz была оценена на основе теории, используя формулу (4) и учитывая экспериментально измеренную область стабилизации $\Delta\Omega_{exp} \approx 350$ МГц и ширину линии свободного многочастотного лазерного диода Δv_{free} не менее 1 ГГц:

$$\Delta v_{est} = \frac{\Delta v_{free}^3}{Q_m^2 \Delta\Omega_{exp}^2}. \quad (5)$$

Подстройка частоты электрическим полем

Приложение постоянного электрического поля на микрорезонатор из электрооптического материала вызывает изменение показателя преломления материала микрорезонатора и, как следствие, сдвиг собственных частот микрорезонатора. Существует множество материалов с сильным линейным электрооптическим коэффициентом r_{33} , однако наиболее распространённым в научных исследованиях материалом является ниобат лития. Резонаторы из ниобата лития также могут быть использованы для получения затягивания с быстрой подстройкой частоты. Ниобат лития обладает электрооптическим коэффициентом, равным $r_{33} = 31$ пм/В, который несильно отличается от tantalата лития. Однако добротность резонаторов из ниобата лития получается ниже. В статье [8] продемонстрирована добротность $3 \cdot 10^8$, в то время как достигнутая добротность резонаторов из tantalата лития составляет $Q = 10^9$ [9].

В данной работе было произведено экспериментальное исследование возможности быстрой подстройки частоты микрорезонатора из LiTaO_3 , обладающего большим линейным электрооптическим эффектом, с помощью внешнего электрического поля и проведено сравнение с теоретическими формулами:

$$\delta\nu_{TE} = f_0 \frac{n_e}{2} r_{33} E_z \quad (6)$$

и

$$\delta\nu_{TM} = f_0 \frac{n_o}{2} r_{33} E_z, \quad (7)$$

где E_z — поле внутри микрорезонатора; f_0 — собственная частота микрорезонатора. Вычисление поля E_z производилось двумя способами: с помощью выражения $E_z = U/d$ и помощью численного моделирования. Так как добротность для TE -мод окказалась выше, чем для TM -мод, была выставлена вертикальная поляризация излучения диодного лазера и оставалась неизменной в дальнейших измерениях. Подавая напряжение на резонатор, как это показано на рис. 5а и 5б, на экране осциллографа наблюдалось периодическое движение провалов (см. рис. 2) с частотой напряжения с генератора. Таким образом можно быстро перестраивать частоту затянутого лазера. Напряжение подавалось с генератора с амплитудой в диапазоне от 2,5 до 10 В. Была измерена зависимость сдвигов провалов от напряжения, приложенного на резонатор, которая показана на рис 5в. Видно, что она является линейной, что согласуется с формулой (6). Небольшое расхождение объясняется геометрическими особенностями резонатора, в частности, большой толщиной кристалла и неоднородностью электрического поля E_z вблизи боковой поверхности микрорезонатора. Для подтверждения этого нами было проведено численное моделирование сдвигов собственных частот микрорезонатора, результаты которого изображены на рис 5в.

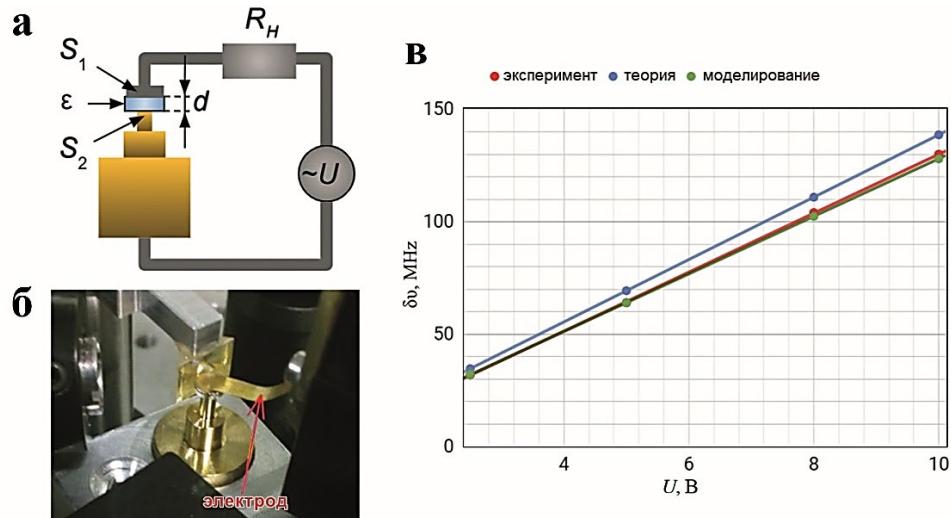


Рис. 5. Электрическая схема подачи напряжения на резонатор (а), фото подведения электродов к резонатору (б), зависимость смещения резонансных частот от напряжения (с): красная линия — экспериментально измеренные сдвиги частот $\delta\nu/\delta U \approx 13,2$ МГц/В, зелёная линия — результаты численного моделирования методом конечных элементов, синяя линия — теоретическая оценка

Выводы

В результате был собран и отлажен экспериментальный стенд для измерения добротности и электрооптического коэффициента оптических микрорезонаторов с модами «шепчущей галереи» из tantalата лития. Была проведена работа по увеличению добротности резонатора и максимизации эффективности связи с этим резонатором, что позволило в итоге наблюдать эффект затягивания. Экспериментально продемонстрирована ненагруженная добротность микрорезонаторов с модами «шепчущей галереи» из tantalата лития $Q_{\text{exp}} = 0,9 \cdot 10^8$. Также был осуществлён метод подачи напряжения на резонатор и экспериментально изучено преимущество электрооптических материалов в виде быстрой перестройки частоты микрорезонатора. Измеренный электрооптический коэффициент для резонатора толщиной 1 мм и диаметром 3 мм составил $\delta f / \delta U \approx 13,2$ МГц/В. Также была экспериментально измерена область стабилизации частоты $\Delta\Omega_{\text{exp}} \approx 350$ МГц и произведена оценка ширины линии $\Delta\nu_{\text{est}} \approx 10^4$ Гц. В итоге можно утверждать, что затягивание является достаточно простым и эффективным способом стабилизации лазера, с помощью которого возможно подавлять шумы внешнего лазера и получать огромное сужение спектральной линии лазера. Однако стоит учитывать, что данный метод является требовательным к добротности резонатора и нуждается в качественной установке, не подверженной влиянию внешних воздействий.

Список литературы

1. Newman Z. L., Maurice V., Drake T. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock // Optica. — 2019. — No. 6. — P. 680–685.
2. Gorodetsky M.L., Pryamikov A.D., Ilchenko V.S. Rayleigh scattering in high-Q microspheres // Journal of the Optical Society of America B. — 2000. — No. 26. — P. 1051–1057.
3. Galiev R.R., Pavlov N.G., Kondratiev N.M. Spectrum collapse, narrow linewidth, and Bogatov effect in diode lasers locked to high-Q optical microresonators // Opt. Express. — 2018. — No. 26. — P. 30509–30522.
4. Pavlov N.G., Koptyaev S., Lihachev G.V. Narrow-linewidth lasing and soliton Kerr microcombs with ordinary laser diodes // Nature Photonics. — 2018. — No. 12. — P. 694–698.
5. Pavlov V.I., Kondratiev N.M., Bilenko I.A. Numerical Simulation of Influence of the Thermal and Mechanical Fluctuations in the Coupling Elements of Microresonators // Proc. EFTF/IFCS. — 2021. — P. 1–4.
6. Wang J., Zhu B., Hao Zh., Bo F., Wang X., Gao F., Li Y., Zhang G. Thermo-optic effects in on-chip lithium niobate microdisk resonators // Opt. Express. — 2016. — No. 24. — P. 21869–21879.

7. Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Cherenkov A.V., Voloshin A.S., Pavlov N.G., Koptyaev S., Gorodetsky M.L. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator // Optics Express. — 2017. — 28167.
8. Dale E., Liang W., Eliyahu D., Savchenkov A.A., Ilchenko V.S., Matsko A.B., Seidel D., Maleki L. On phase noise of self-injection locked semiconductor lasers // Physics Optics. — 2014. — No. 24.
9. Ilchenko V.S., Dale E., Liang W., Byrd J., Eliyahu D., Savchenkov A.A., Matsko A.B., Seidel D. Compact tunable kHz-linewidth semiconductor laser stabilized with a whispering-gallery mode microresonator // Proc. SPIE. — 2011. — P. 7913.

Статья поступила в редакцию: 31.10.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 25.10.2022 г.

Статья принята в работу: 01.11.2022 г.