

# Формирование поля излучения диодной накачки в кювете газового лазера

© Г.Н. Качалин,<sup>1,2</sup> Н.А. Кирдяев,<sup>1</sup> С.А. Кунин,<sup>1</sup> М.Д. Наумов,<sup>1,2</sup> О.Л. Течко,<sup>1,2</sup> В.А. Панарин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>РФЯЦ-ВНИИЭФ, Институт лазерно-физических исследований, 607190 Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>2</sup>Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Сарове, 607328 Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>3</sup>Научно-производственное предприятие „Инжект“, 410043 Саратов, Россия  
e-mail: sarov.msu@yandex.ru

Поступило в Редакцию 15 октября 2024 г.  
В окончательной редакции 7 апреля 2025 г.  
Принято к публикации 17 апреля 2025 г.

Рассмотрен вариант системы поперечного ввода излучения накачки модулей лазерных диодов с волоконным выводом в кювету газового лазера. Проведены эксперименты по исследованию распределения излучения от единичного силового оптического волокна диаметром 400  $\mu\text{m}$ . По результатам эксперимента создана программная модель торца волокна с заданными пространственно-угловыми характеристиками излучения. Проведены эксперименты по исследованию распределения интенсивности излучения в различных сечениях внутри активной зоны лазера от источника излучения размером 20.5  $\times$  10.5 mm. В программном пакете создан цифровой аналог оптического тракта ввода излучения накачки в активную среду, который показывает хорошее согласование с полученными экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** лазерные диоды, диодная накачка, интенсивность, кварцевое оптическое волокно.

DOI: 10.61011/JTF.2025.08.60906.355-24

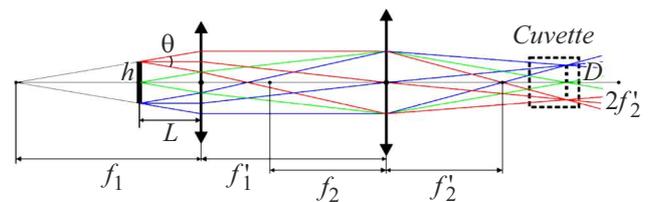
## Введение

К настоящему моменту времени известно множество вариантов исполнения лазеров на парах щелочных металлов как с торцевой, так и с поперечной диодной накачкой [1–5]. В настоящей работе описывается реализация поперечного ввода излучения диодной накачки. Ее основу составляют лазерные диодные линейки (модули), излучение от которых оптической системой внутри модуля фокусируется на вход силового кварцевого оптического волокна. Для формирования единого тела свечения волокна собираются в жгуты, торцы зачищаются от защитной оболочки, полируются и устанавливаются в одной плоскости. Преимуществом такого построения тела свечения является его легкая масштабируемость, значительная плотность потока излучения на выходе  $\sim 6 \text{ kW/cm}^2$  и возможность выноса тела свечения от диодных модулей и обслуживающей аппаратуры, обеспечивая дополнительную безопасность персоналу, а также легкость настройки и обслуживания всей системы накачки в целом. Недостатком является большая расходимость излучения на выходе из волокна  $\sim 0.4 \text{ rad}$ , которая формирует ряд существенных требований при построении системы ввода, так как для реализации поперечной диодной накачки в кювете лазера на парах щелочных металлов необходимо создать равномерную и протяженную рабочую зону накачки с необходимой интенсивностью. Чтобы выполнить поставленные требования были разработаны несколько вариан-

тов оптических схем системы ввода, один из них описан в настоящей работе. Цель работы — создание расчетной модели системы поперечной накачки газового лазера и ее экспериментальная апробация, позволившие создать внутри кюветы поле накачки в форме прямой призмы, которое обеспечивает улучшение выходных параметров лазерного излучения.

## 1. Оптическая схема

Для осуществления поперечного ввода накачки применяются оптические схемы, перестраивающие изображение источника накачки в кювету лазера [6,7]. В настоящей работе авторами рассмотрена оптическая схема, приведенная на рис. 1. Источник излучения устанавли-



**Рис. 1.** Перестроение изображения источника излучения в кювету лазера:  $h$  — размер источника,  $\theta$  — расходимость излучения,  $L$  — расстояние от источника до линзы,  $D$  — поперечный размер области накачки,  $f_1', f_1; f_2', f_2$  — фокусные расстояния первой и второй линз.

ливается на расстоянии  $d$  от первой линзы, фокусное расстояние которой находится по формуле (1). В таком случае после прохождения излучением первой линзы обеспечивается коллимация крайних лучей источника:

$$f'_1 = \frac{h}{\theta} + L. \tag{1}$$

Вторая линза устанавливается в фокусе первой. Фокусное расстояние второй линзы рассчитывается исходя из необходимых размеров рабочей зоны накачки:

$$f'_2 = \frac{f_1^2 \theta}{f_1 \theta + D} \frac{D}{h}. \tag{2}$$

Длина рабочей зоны накачки в данном варианте не максимально возможная из всех рассматриваемых авторами работы схем, удовлетворяющих требованиям поперечного ввода. Преимуществом является наиболее равномерное распределение плотности потока накачки в рабочей зоне лазерной кюветы, а также возможность удаления рабочей зоны накачки от последней поверхности линзы, что позволяет проводить различные конструкторские доработки кюветы.

## 2. Моделирование источника излучения накачки

В интересах создания цифрового аналога источника излучения модулей лазерных диодов с волоконным выводом, учитывающего все особенности применяемой системы передачи излучения от диодных линеек (диодные линейки–микрооптика–волокно), был проведен эксперимент по регистрированию излучения от единичного оптического волокна на различных расстояниях от него. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

Волокно крепилось в оправу, напротив торца волокна на отдельной стойке устанавливался узел регистрации, включающий экран, камеру и фильтры. Экраном служил лист ватмана, находящийся в фокальной плоскости объектива камеры. Регистрация распределения интенсивности происходила путем снятия серии кадров на трех разных расстояниях от торца волокна. Аналогично эксперименту в программном пакете геометрической трассировки лучей была смоделирована аналогичная схема, только вместо листа ватмана и камеры использовались детектирующие плоскости, представляющие

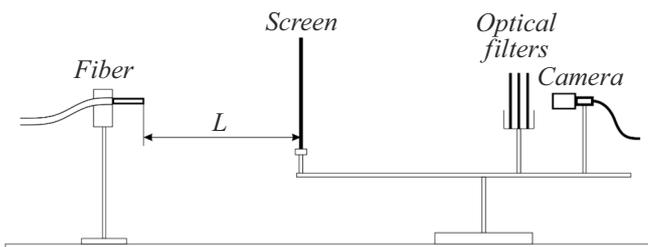


Рис. 2. Схема эксперимента.

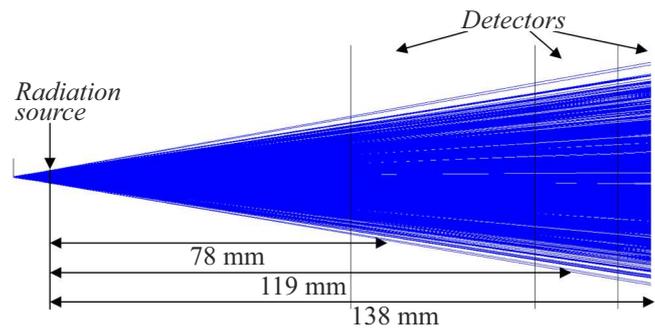


Рис. 3. Общий вид схемы по моделированию торца волокна.

собой матрицу камеры в заданном масштабе. Детектирующие плоскости, как и лист ватмана, устанавливались на расстояниях  $L = 78, 119$  и  $138$  мм. Общий вид схемы представлен на рис. 3.

В качестве модели торца волокна выступал диск радиусом  $R$ . Профиль интенсивности на выходе задавался выражением

$$I(r) = A + Br^2 + Cr^4, \tag{3}$$

где  $0 < r < R$ .

После определения случайным образом стартовой позиции луча лучи испускаются от поверхности в конус, числовая апертура которого зависит от радиальных координат:

$$NA(r) = D + Er^2 + Fr^4. \tag{4}$$

В пределах конуса, определенного числовой апертурой, распределение лучей — однородное. Величины параметров  $R, A, B, C, D, E$  и  $F$  задаются в программном пакете.

Величина  $R$  известна, составляет  $0.24$  мм. Величины параметров  $A, B, C, D, E$  и  $F$  варьировались до совпадения профиля интенсивности, полученного в эксперименте, с профилем интенсивности рассчитанного в программном пакете. В итоге модель плоского торца волокна имеет следующие параметры величин:  $R = 0.24, A = 1, B = 0, C = -100, D = 0.2, E = -2.2, F = 0$ . Профили распределения интенсивности, зарегистрированные в эксперименте и рассчитанные в программном пакете, показаны на рис. 4.

Используя цифровой аналог единичного волокна, можно смоделировать любое желаемое тело свечения, представляющее собой пространственную совокупность единичных волокон.

## 3. Система ввода излучения накачки

Для оптической накачки лазера на парах щелочного металла было собрано тело свечения размером  $20.5 \times 10.5$  мм, состоящее из 800 волокон. В качестве формирующей оптической схемы системы накачки была рассчитана схема, описанная выше. Прежде чем вводить излучение накачки в лазерную кювету, был проведен

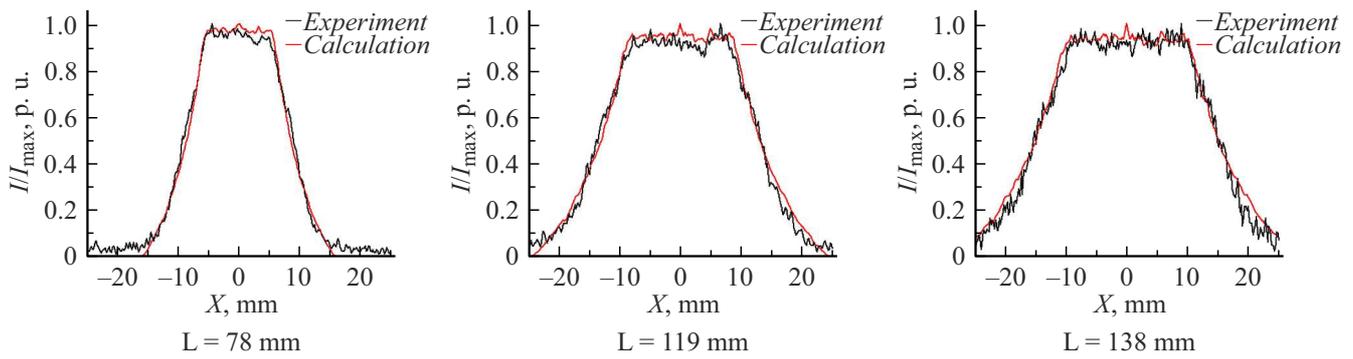


Рис. 4. Профили распределения интенсивности, зарегистрированные в эксперименте и рассчитанные в программном пакете.

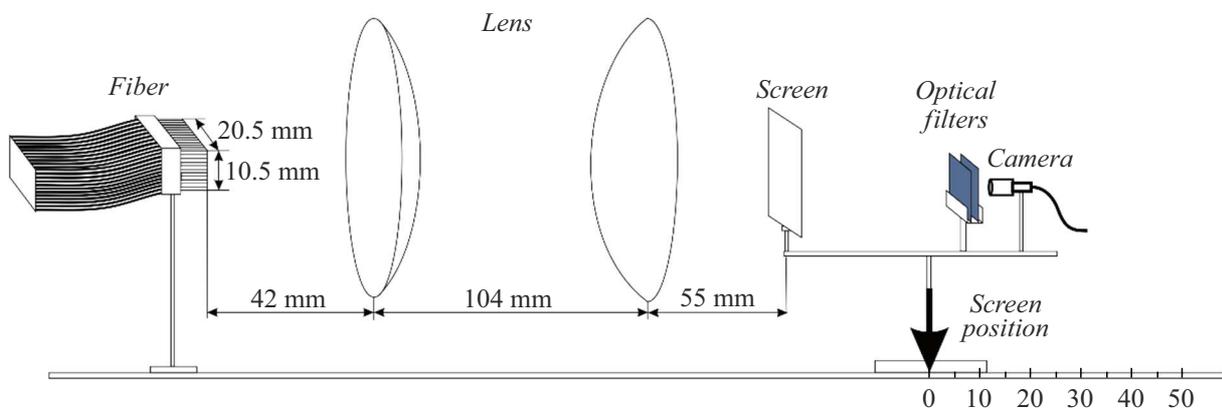


Рис. 5. Схема регистрации распределения интенсивности излучения накачки внутри кюветы от тела свечения  $20.5 \times 10.5$  мм.

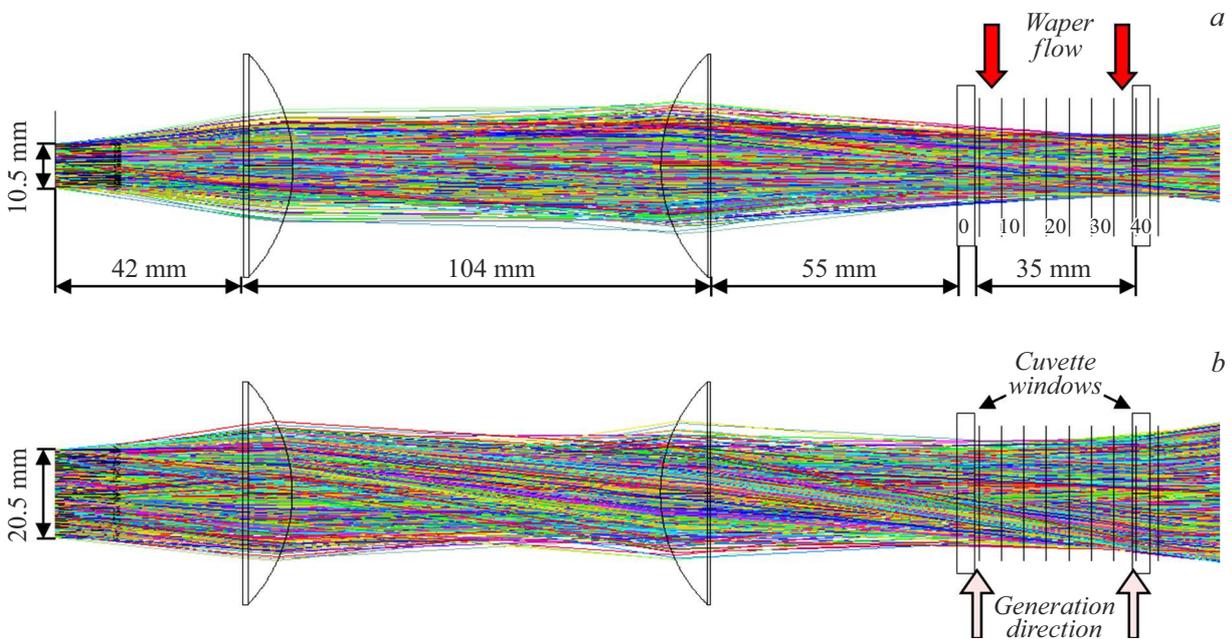


Рис. 6. Оптическая схема системы ввода излучения накачки в лазерную кювету: *a* — вид сбоку (по направлению генерации), *b* — вид сверху (по направлению потока паров рубидия).

эксперимент по регистрации распределения интенсивности накачки в плоскостях, соответствующих плоскостям

внутри кюветы. Схема эксперимента представлена на рис. 5.

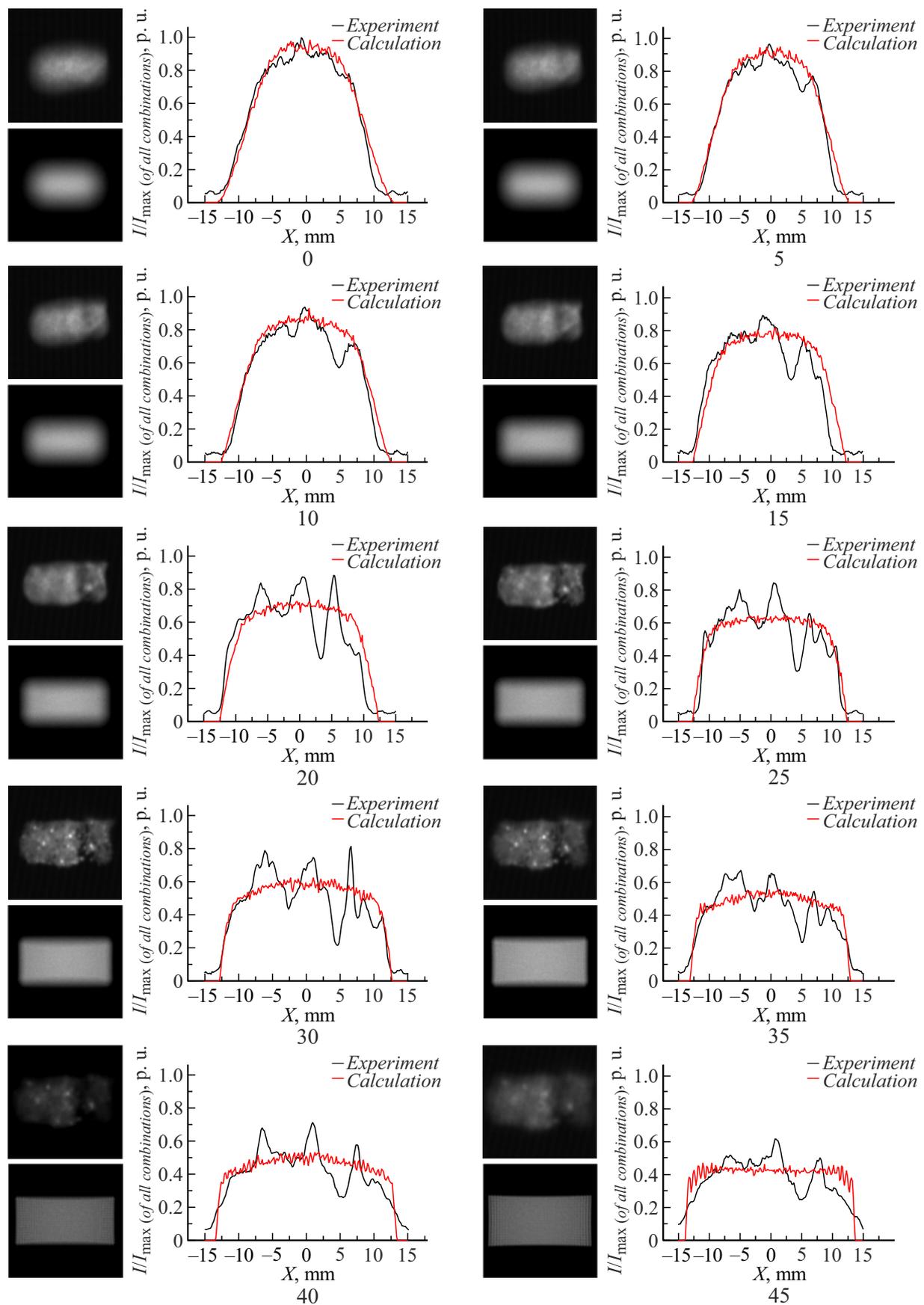


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные распределения интенсивности внутри лазерной кюветы от тела свечения  $20.5 \times 10.5$  mm.

Регистрация распределения интенсивности проводилась на экране, находящимся в фокусе камеры и представляющим собой лист ватмана. Начальное положение экрана (0) соответствует внешней поверхности входного окна кюветы. Следующие положения экрана отличаются на 5 mm вдоль распространения излучения накачки. Последнее положение экрана (45) соответствует плоскости, расположенной на расстоянии 2 mm от внешней поверхности выходного окна кюветы.

В программном пакете также была смоделирована аналогичная эксперименту оптическая схема системы ввода излучения. Тело свечения представляло собой 800 светящихся дисков, равномерно заполняющих прямоугольный размер  $20.5 \times 10.5$  mm. Смоделированная система ввода для тела свечения  $20.5 \times 10.5$  mm с установленными для регистрации распределения интенсивности излучения детекторами представлена на рис. 6.

На кадрах, полученных в эксперименте и рассчитанные в программном пакете, были сделаны горизонтальные (по направлению генерации) прописи распределения интенсивности. На рис. 7 показано сопоставление экспериментальных и расчетных данных. На фотографиях рис. 7 представлены расчетные сверху и экспериментальные внизу двумерные распределения интенсивности излучения в различных плоскостях лазерной кюветы, а также их прописи в горизонтальном направлении через центр изображений.

На экспериментальных сечениях внутри кюветы хорошо видны всплески и провалы интенсивности. Всплески вызваны тем, что на некоторых диодных модулях ток превысил установленное значение, а провалы являются следствием отказа некоторых блоков питания диодных модулей. В целом, прописи сечений показывают хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных, что говорит о правильности выбора теоретической модели единичного торца волокна.

## Заключение

Описан способ поперечного ввода излучения диодной накачки с волоконным выводом в кювету лазера на парах щелочных металлов с достаточной высокой и равномерно распределенной плотностью потока внутри активной зоны лазера. Получена модель плоского торца волокна, дающая возможность проектировать любое тело свечения, состоящее из торцов волокон. Смоделирован программный аналог системы ввода излучения, показывающий хорошее соответствие экспериментальным данным. Полученные результаты позволяют использовать модель для выполнения различных практических задач по численному моделированию оптического тракта системы ввода излучения накачки в интересах создания геометрических моделей кювет мощных газовых лазеров с поперечной диодной накачкой и протоком среды через зону генерации.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] R.J. Beach, W.F. Krupke, V.K. Kanz, S.A. Payne, J.T. Early. *Proceed. SPIE*, **5448**, (2004).
- [2] B.V. Zhdanov, R.J. Knize, *Proceed. SPIE*, **7022**, (2008).
- [3] B. Zhdanov, C. Maes, T. Ehrenreich, A. Havko, N. Koval, T. Meeker, B. Worker, B. Flusche, R.J. Knize. *Opt. Comm.*, **270**, (2007).
- [4] B.V. Zhdanov, M.K. Shaffer, J. Sell, R.J. Knize. *Proc. SPIE*, **7196**, 71960F, (2009).
- [5] А.В. Богачев, С.Г. Гаранин, А.М. Дудов, В.А. Ерошенко, С.М. Куликов, Г.Т. Микаелян, В.А. Панарин, В.О. Паутов, А.В. Рус, С.А. Сухарев. *Квант. электрон.*, **42** (2), 95 (2012).
- [6] *Способ поперечной накачки рабочей среды лазера* (Пат. RU 2714781 от 19.02.2020 г.)
- [7] F. William, U.S. Krupke. (ePatent No. US6693942B2, 2004)