

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ФОРМ-ФАКТОРА ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА НА СТАДИИ ЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В.С. Болдырев¹

boldyrev.v.s@bmstu.ru

В.С. Белый²

belyi.v.s@muctr.ru

Н.А. Богатов^{1,2}

bogatov.n.a@bmstu.ru

А.С. Савина^{1,2}

savina.a.s@bmstu.ru

А.П. Зоткин^{1,2}

zotkin.a.p@bmstu.ru

Е.И. Пентюхин^{1,2}

pentyukhin.e.i@bmstu.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

Аннотация

При всем многообразии данных в литературе по вопросу определения функции форм-фактора лазеров, в том числе о зависимости между техническими параметрами и свойствами атомов активного вещества, в настоящее время не существует единой методики для определения функции форм-фактора лазерного излучения. Представлена разработанная авторами научная методика расчетного определения явного вида функции форм-фактора излучения гелий-неонового лазера на первичной стадии его жизненного цикла — на стадии проектирования. Методика основана на взаимосвязи спектральной плотности излучения лазера с его техническими параметрами и свойствами молекулярной структуры активного вещества и описана с использованием соответствующего корректного математического аппарата. Доказано соответствие разработанной методики требованиям реалистичности, воспроизводимости, внятности, соответствия цели и задачам, обоснованности и результативности. Кроме методики в работе также приведен пример решения задачи определения явного вида функции форм-фактора в виде уравнения спектральной линии лазерного излучения гелий-неонового лазера для режима развитой генерации. Предложенная методика может стать основой для разработки конкрет-

Ключевые слова

Гелий-неоновый лазер, спектр излучения, функция, форм-фактор, техническое задание, жизненный цикл, опытный образец, опытная установка, расчетный метод

ного нормативно-технического документа, представляющего практический интерес для научно-производственных предприятий — разработчиков лазерной техники

Поступила 09.02.2023

Принята 05.09.2023

© Автор(ы), 2024

Введение. При подготовке к проведению исследовательских работ в области волновой и квантовой оптики зачастую возникают трудности с определением спектров лазерного излучения. В современной литературе уделено много внимания проблемам, связанным с определением функции форм-фактора лазеров [1–8]. Показана взаимосвязь между техническими параметрами резонаторов, систем накачки, а также свойствами атомов или молекул активного вещества и характеристиками спектральных линий сигнальных и шумовых составляющих лазерного излучения. Однако, несмотря на природу активного вещества лазеров и связанными с ней особенностями определения спектров излучения, не существует единой четкой методики определения функции форм-фактора лазерного излучения [9–18]. Есть только корректный математический аппарат, показывающий взаимосвязь спектральной плотности лазерного излучения с техническими параметрами лазера и свойствами молекулярной структуры активного вещества [19].

Цель работы — разработка методики определения явного вида функции форм-фактора лазерного излучения на основе алгоритма, подробно описанного в [20–22].

Следует отметить, что конструкцией тех или иных образцов лазеров может предусматриваться применение различных, кардинально отличающихся друг от друга по свойствам молекулярной структуры видов активного вещества. В связи с этим для каждого вида активного вещества особенности определения функций форм-факторов излучения могут быть различными. Предложенная методика разработана для функционирующего в режиме развитой генерации гелий-неонового лазера, относящегося к лазерам класса А.

Изделия лазерной техники, основу конструкции которых составляет гелий-неоновый лазер, как и любые технические объекты, в процессе эксплуатации проходят традиционные стадии жизненного цикла. На стадиях, связанных с проектированием и организацией НИОКР, имеет место решение вопроса, связанного с определением спектра лазерного излучения. Перечислим стадии жизненного цикла гелий-неонового лазера и методы определения функции форм-фактора при проектировании и разработке гелий-неонового лазера.

1. Проектирование. Результат — эскизно-технический проект. Метод определения форм-фактора — расчетный.

2. Разработка опытной установки. Результат — опытная установка. Метод определения форм-фактора — расчетно-экспериментальный.

3. Разработка опытного образца. Результат — опытный образец. Метод определения форм-фактора — экспериментальный.

Результаты анализа показывают, что:

– в процессе выполнения НИОКР, направленных на разработку опытного образца гелий-неонового лазера, существует возможность экспериментальным методом определить форму и параметры спектральной линии лазерного излучения. Для этого можно использовать анализатор спектра или другие способы, позволяющие на приборном уровне количественно оценить значения частоты гармоник, входящих в спектр излучения;

– при наличии опытной установки, включающей в себя основные элементы конструкции гелий-неонового лазера*, есть возможность экспериментального определения спектральной плотности излучения и измерения технических и физических параметров установки с последующим выводом функции форм-фактора или расчета значений частот гармоник. В результате задача определения функции форм-фактора решается расчетно-экспериментальным методом, когда экспериментально получают исходные данные, а решение конечной задачи осуществляется применением соответствующего математического аппарата;

– до момента начала выполнения НИОКР, в процессе проведения эскизно-технического проектирования, когда еще нет готового опытного образца гелий-неонового лазера или хотя бы опытной установки, способной генерировать лазерное излучение, задача определения функции форм-фактора решается только расчетным методом, предполагающим корректное использование математического аппарата, позволяющего связать функцию форм-фактора с физическими параметрами проектируемого лазера.

С учетом изложенного при проектировании гелий-неонового лазера задача определения форм-фактора, сводящаяся к поиску явного вида функции спектральной плотности лазерного излучения, может быть решена исключительно расчетным методом.

Постановка задачи. Требуется с учетом алгоритма определения спектральной плотности расчетным методом разработать методику, удо-

* Емкость, заряженная активным веществом — газовой смесью гелия с неонем, два зеркала резонатора, совокупность собранных в электрическую схему элементов, выполняющих функцию системы накачки.

влетворяющую требованиям реалистичности, воспроизводимости, внятности, соответствия цели и задачам, обоснованности и результативности. Используя эту методику, разработчик при наличии жестких требований заказчика к спектру лазерного излучения сможет в явном виде получить функцию форм-фактора проектируемого гелий-неонового лазера.

Методика определения функции форм-фактора гелий-неонового лазера на стадии его проектирования. Предлагаемая методика обоснована алгоритмом расчета спектральной плотности и представляет собой пошаговую процедуру реализации последнего. Цель методики — дать описание последовательности действий, приводимых к решению задачи определения явного вида функции форм-фактора излучения гелий-неонового лазера расчетным методом. Порядок реализации методики предполагает последовательное воспроизведение определенных шагов, каждый из которых является конечным и приводит к конкретному результату.

Шаг 1. Разработчик определяет или задает значения физических величин, которые являются исходными данными для поиска явного вида функции форм-фактора. Эти физические величины представляют собой параметры гелий-неонового лазера:

- число фотонов в моде резонатора N , см^{-3} ;
- средняя инверсия населенности двухуровневой системы перехода \bar{n} , см^{-3} ;
- время затухания амплитуды моды резонатора τ_a , с;
- время затухания вектора поляризации атомов активной среды лазера τ_σ , с;
- время затухания процессов инверсии населенности двухуровневой системы перехода τ_D , с;
- частота фотона моды резонатора ν^* , Гц;
- частота Раби в поле вакуумных флуктуаций резонатора Ω_R , Гц.

Шаг 2. По значениям N , \bar{n} и τ_a определяют диффузию фазы, Гц:

$$D_\varphi = \frac{2\bar{n} + 1}{2\tau_a N}. \quad (1)$$

Шаг 3. По значениям τ_σ , τ_D , Ω_R и по значению D_φ , вычисленному по (1), выполняют расчет диффузии амплитуды излучения, Гц:

$$D_a = \frac{8N\tau_D\tau_\sigma\Omega_R^2}{\tau_a} + D_\varphi. \quad (2)$$

Шаг 4. Разработчик задает значения нормировочных констант отдельно для шумовой ($S_{\varphi 0}$) и сигнальной (S_{a0}) составляющих спектральной плотности лазерного излучения исходя из требований к отношению сигнал/шум.

Шаг 5. По значениям ν^* , $S_{\varphi 0}$, S_{a0} и D_{φ} , D_a определяют явные виды функций спектральной плотности шумовой и сигнальной составляющих спектральной плотности излучения, Вт:

$$S_{\varphi}(\nu) = S_{\varphi 0} \frac{D_{\varphi}}{\pi \left[4\pi^2 (\nu - \nu^*)^2 + D_{\varphi}^2 \right]}, \quad (3)$$

$$S_a(\nu) = S_{a0} \frac{D_a}{\pi \left[4\pi^2 (\nu - \nu^*)^2 + D_a^2 \right]}. \quad (4)$$

Шаг 6. Суммированием выражений (3) и (4) формируется окончательный вид функции форм-фактора лазерного излучения:

$$S(\nu) = \frac{1}{\pi} \left(S_{\varphi 0} \frac{D_{\varphi}}{\left[4\pi^2 (\nu - \nu^*)^2 + D_{\varphi}^2 \right]} + S_{a0} \frac{D_a}{\left[4\pi^2 (\nu - \nu^*)^2 + D_a^2 \right]} \right). \quad (5)$$

Шаг 7. Построить график функции вида (5).

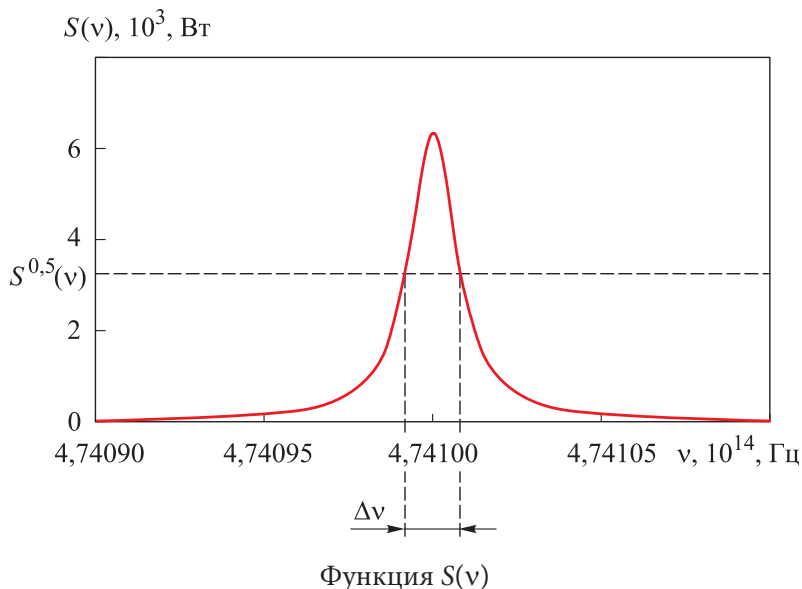
С учетом изложенного предлагаемая методика является реалистичной, внятной и обоснованной, приводит к получению конкретного научного результата и может стать основой для разработки конкретного нормативно-технического документа для предприятия — разработчика лазерной техники.

Пример использования методики. Исходные данные для определения функции форм-фактора гелий-неонового лазера в режиме развитой генерации: $N = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, $\bar{n} = 10^9 \text{ см}^{-3}$; $\tau_a = 10^{-7} \text{ с}$; $\tau_{\sigma} = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ с}$; $\tau_D = 10^{-9} \text{ с}$; $\nu^* = 4,741 \cdot 10^{14}$; $\Omega_R = 10^{-9} \text{ Гц}$.

Явный вид функции форм-фактора:

$$S(\nu) \approx \frac{5 \cdot 10^{17}}{\pi \left[(6,283 \cdot 10^{14} \nu - 2,979 \cdot 10^{15})^2 + 2,5 \cdot 10^{19} \right]} + \frac{8 \cdot 10^{17}}{\pi \left[(6,283 \cdot 10^{14} \nu - 2,979 \cdot 10^{15})^2 + 2,011 \cdot 10^{28} \right]}.$$

График функции $S(\nu)$ приведен на рисунке.



В соответствии с полученными данными: амплитуда излучения на резонансной частоте $S(\nu^*) = 0,64$ мВт; ширина спектра на уровне 0,5 не превышает $\Delta\nu = 2$ ГГц.

Рассмотренный пример свидетельствует о результативности предлагаемой методики.

Заключение. Предложенная методика удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям, т. е. является реалистичной, воспроизводимой, внятной, соответствует цели и решаемой задаче, является обоснованной и результативной. Краткое математическое описание методики (см. (1)–(5)) показывает соответствие цели и задачам, стоящим перед разработчиками лазеров. Рассмотренный пример решения задачи определения функции форм-фактора показывает результативность методики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иманкулов З.И., Дорофеенко А.В., Пухов А.А. Инфракрасный гелий-неоновый лазер с поперечным СВЧ-разрядом в магнитном поле. *Вестник Иссык-Кульского ун-та*, 2015, № 40-1, с. 24–27. EDN: KEWWFW
- [2] Исоева Б.И. Лазерное излучение как лечебный фактор (обзор литературы). *Биология и интегративная медицина*, 2022, № 6 (59), с. 141–161. EDN: PSZLFK
- [3] Кузин М.М. Применение и перспективы использования гелий-неоновых лазеров. *Россия молодая: Сб. матер. XIV Всерос., науч.-практ. конф. молод. ученых*

(с междунар. участием), Кемерово, 18–21 апреля 2023 г., 2023, с. 95206.1–95206.3. EDN: LOPTFA

[4] Киселев А.С., Смирнов Е.А. Методика оценки эффективности возбуждения активной среды гелий-неонового лазера. *СПбНТОРЭС: Тр. НТК*, 2021, № 1 (76), с. 305–306. EDN: PQWPVS

[5] Кожевников В.А., Привалов В.Е., Фотиади А.Э. Новый подход к оценке мощности излучения гелий-неонового лазера с различной геометрией поперечного сечения активного элемента. *НТВ СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2021, т. 14, № 3, с. 133–145. EDN: YEQIZN. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14310>

[6] Дубинин Д.Е., Гаар Н.П. Исследование влияния излучения гелий-неонового лазера на электрохимическое растворение материалов. *Актуальные проблемы в машиностроении*, 2020, т. 7, № 1-2, с. 58–62. EDN: JKORUZ

[7] Жуков Е.Т., Харчев О.П. Оценка влияния флуктуаций на нестабильность стандарта частоты на He–Ne-лазере. *Труды ИПА РАН*, 2012, № 23, с. 346–349. EDN: QZXHRV

[8] Самсон А.М., Котомцева Л.А., Лойко Н.А. Автоколебания в лазерах. Минск, Наука, 1990.

[9] Вейб Г., Нол Т., Мюк М. Новый форм-фактор светильников и новые световые эффекты. *Полупроводниковая светотехника*, 2015, т. 5, № 37, с. 46–52. EDN: UMQFFV

[10] Кулясов П.С., Никулин Е.А. Ускорение вычислений форм-факторов при расчете освещенности сцены методом излучательности. *Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского*. 2012, № 3-1, с. 184–188. EDN: PAJTAV

[11] Михашин Д.А. Разновидность лазеров. Устройство и принцип работы, будущее развитие. *Старт в науке–2022. Сб. ст. II Междунар. науч.-исслед. конкурса*. В 2 ч., Петрозаводск, 14 ноября 2022 г., 2022, с. 58–64. EDN: ADEYWJ

[12] Лазеры в науке, технике, медицине. *Сб. науч. тр. XXIX Междунар. конф.*, Москва, 16–18 мая 2018 г. Москва, МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2018. EDN: XWRQJN

[13] Полякова Л.В., Малюгина А.С. Использование лазера в измерительной технике. *Успехи в химии и химической технологии*, 2021, т. 35, № 5 (240), с. 178–179. EDN: YACHCM

[14] Федоров А.И. Лазеры, разработанные в ИОА СО РАН. *Успехи прикладной физики*. 2021, т. 9, № 5, с. 417–429. EDN: XJKQEF. DOI: <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-5-417-429>

[15] Астапович М.С., Гладышев А.В., Худяков М.М. и др. Полностью волоконный газовый рамановский лазер с длиной волны генерации 4,4 мкм. *Фотон-экспресс*, 2019, № 6 (158), с. 239–240. DOI: <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16120>

[16] Авдеев А.В., Борейшо А.С., Киселев И.А. и др. Сверхзвуковые газовые и химические лазеры: развитие технологий. *Фотоника*, 2020, т. 14, № 8, с. 648–661. DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.8.648.661>

- [17] Ионин А.А., Киняевский И.О., Климачев Ю.М. и др. Широкодиапазонный ИК лазерный источник (2,5–17 мкм) для диагностики плазмы. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2016, т. 7, № 5, с. 383–390.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079562916050080>
- [18] Kameyama N., Yoshida H., Fukagawa H., et al. Thin-film processing of polypropylene and polystyrene sheets by a continuous wave CO₂ laser with the Cu cooling base. *Polymers*, 2021, vol. 13, iss. 9, p. 1448. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13091448>
- [19] Rejani A., Hashemzadeh M. CO₂ laser-air cutting of glass-fibrereinforced unsaturated polyester (GFRUP): an experimental investigation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 117, pp. 2627–2638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07180-6>
- [20] Шерстобитов В.Е., Родионов А.Ю. Лазер, слэб-лазер, газовый лазер (варианты) и газовый слэб-лазер: № 2003114580/28. Пат. № 2243620 С1 Российская Федерация. МПК H01S 3/063, H01S 3/083. Заявл. 06.05.2003, опубл. 27.12.2004. EDN: XAPQZL
- [21] 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. EDN: RCVHYX
- [22] Митронин А.В., Беляева Т.С., Жекова А.А. Оценка эффективности применения диодного лазера и фотоактивируемой терапии при эндодонтическом лечении. *Стоматология*, 2016, т. 95, № 6-2, с. 15–16. EDN: XWRDAT

Болдырев Вениамин Станиславович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Химия» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделом «Инжиниринг химико-технологических систем» Инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Белый Вячеслав Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Богатов Никита Алексеевич — научный сотрудник отдела «Инжиниринг химико-технологических систем» Инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); старший преподаватель кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Савина Анастасия Сергеевна — научный сотрудник отдела «Инжиниринг химико-технологических систем» Инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); старший преподаватель кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева, аспирант кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Зоткин Александр Павлович — инженер отдела «Инжиниринг химико-технологических систем» Инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); лаборант кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Пентюхин Егор Игоревич — техник отдела «Инжиниринг химико-технологических систем» Инжинирингового центра «Автоматика и робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); лаборант кафедры физики РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Болдырев В.С., Белый В.С., Богатов Н.А. и др. Методика определения функции форм-фактора гелий-неонового лазера на стадии его проектирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 4 (115), с. 35–46. EDN: UYOOQW

**FORM FACTOR DETERMINATION METHODOLOGY
AT THE HELIUM-NEON LASER DESIGN STAGE**

V.S. Boldyrev¹

boldyrev.v.s@bmstu.ru

V.S. Belyi²

belyi.v.s@muctr.ru

N.A. Bogatov^{1,2}

bogatov.n.a@bmstu.ru

A.S. Savina^{1,2}

savina.a.s@bmstu.ru

A.P. Zotkin^{1,2}

zotkin.a.p@bmstu.ru

E.I. Pentyukhin^{1,2}

pentyukhin.e.i@bmstu.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

²Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
Moscow, Russian Federation

Abstract

A wide variety of data could be found in literature on the issue of determining the laser form factor function, including relationship between technical parameters and properties of the active substance atoms. However, any unified methodology for determining the laser radiation form factor function is currently missing. The paper presents scientific methodology developed by the authors for computing the explicit form factor function of the helium-neon laser radiation at the initial stage of its life cycle, i.e., the design stage. This methodology is based on relationship between the

Keywords

Helium-neon laser, radiation spectrum, function, form factor, technical specifications, life cycle, prototype, pilot plant, computation method

laser radiation spectral density and its technical parameters and properties of the active substance molecular structure. It is described using the appropriate correct mathematical apparatus. The developed methodology proves meeting the requirements of realism, reproducibility, intelligibility, compliance with goals and objectives, validity and effectiveness. Along with the methodology, the work result also includes an example of solving the problem of determining the explicit form factor function as an equation of the laser radiation spectral line of a helium-neon laser in the advanced generation mode. The proposed tools could become the basis for development of a specific regulatory technical document of practical interest for the research and production enterprises engaged in designing and developing the laser technology

Received 09.02.2023

Accepted 05.09.2023

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Imankulov Z.I., Dorofeenko A.V., Pukhov A.A. Infrared helium-neon laser with transverse microwave discharge in a magnetic field. *Bulletin of Issyk-Kul University*, 2015, no. 40-1, pp. 24–27 (in Russ.). EDN: KEWWFW
- [2] Isoeva B.I. Laser radiation as a healing factor (literature review). *Biology and Integrative Medicine*, 2022, no. 6 (59), pp. 141–161 (in Russ.). EDN: PSZLFK
- [3] Kuzin M.M. [Applications and prospects for the use of helium-neon lasers]. *Rossiya molodaya: Sb. mater. XIV Vseros. nauch.-prakt. konf. molod. uchenykh (s mezhdunar. uchastiem)* [Young Russia: Proc. of the XIV All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists with International Participation], Kemerovo, April 18–21, 2023, pp. 95206.1–95206.3 (in Russ.). EDN: LOPTFA
- [4] Kiselev A.S., Smirnov E.A. [Methodology for assessing the efficiency of excitation of the active medium of a helium-neon laser]. *SPbNTORES: Tr. NTK* [SPbNTORES: Proc. of the NTC], 2021, no. 1 (76), pp. 305–306 (in Russ.). EDN: PQWPVS
- [5] Kozhevnikov V.A., Privalov V.E., Fotiadi A.E. A new approach to estimating the radiation power of a helium-neon laser with different cross-sectional geometries of the active element. *St. Petersburg Polytechnic University Journal: Physics and Mathematics*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 133–145 (in Russ.). EDN: YEQIZN.
DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.14310>
- [6] Dubinin D.E., Gaar N.P. Study of the influence of helium-neon laser radiation on the electrochemical dissolution of materials. *Current Problems in Mechanical Engineering*, 2020, vol. 7, no. 1-2, pp. 58–62 (in Russ.). EDN: JKORUZ
- [7] Zhukov E.T., Kharchev O.P. Estimation of the influence of fluctuations on the instability of the frequency standard on a He–Ne laser. *Proc. of the IIA RAS*, 2012, no. 23, pp. 346–349 (in Russ.). EDN: QZXHRV

- [8] Samson A.M., Kotomtseva L.A., Loiko N.A. Avtokolebaniya v lazerakh [Self-oscillations in lasers]. Minsk, Nauka, 1990.
- [9] Weib G., Nol T., Mück M. New form factor of lamps and new lighting effects. *Semiconductor Lighting Technology*, 2015, vol. 5, no. 37, pp. 46–52 (in Russ.). EDN: UMQFFV
- [10] Kulyasov P.S., Nikulin E.A. Acceleration of form factor calculations when calculating scene illumination using the emissivity method. *Bulletin of Nizhny Novgorod University n.a. N.I. Lobachevsky*, 2012, no. 3-1, pp. 184–188 (in Russ.). EDN: PAJTAV
- [11] Mikhashin D.A. [Variety of lasers. Device and principle of operation. Future development]. *Start v nauke–2022. Sb. st. II Mezhdunar. nauch.-issled. konkursa. V 2 ch.* [Start in Science–2022: Proc. of Articles of the II International Research Competition]. In 2 vol. Petrozavodsk, November 14, 2022, pp. 58–64 (in Russ.). EDN ADEYWJ
- [12] Petrov V.A., ed. [Lasers in science, technology, medicine]. *Sb. nauch. tr. XXIX Mezhdunar. konf.* [Proc. of Scientific Papers XXIX International Conf.], Moscow, May 16–18, 2018. Moscow NTO of Radio Engineering, Electronics and Communications, 2018 (in Russ.). EDN: XWRQJN
- [13] Polyakova L.V., Malyugina A.S. The use of a laser in measuring technology. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2021, vol. 35, no. 5 (240), pp. 178–179 (in Russ.). EDN: YACHCM
- [14] Fedorov A.I. Lasers developed at the IAO SB RAS. *Advances in Applied Physics*, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 417–429 (in Russ.). EDN: XJKQEF.
DOI: <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-5-417-429>
- [15] Astapovich M.S., Gladyshev A.V., Khudyakov M.M., et al. A fully fiber gas Raman laser with a generation wavelength of 4.4 microns. *Photon Express*, 2019, no. 6 (158), pp. 239–240 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16120>
- [16] Avdeev A.V., Boreysho A.S., Kiselev I.A., et al. Supersonic gas and chemical lasers: the development of technologies. *Photonics*, 2020, vol. 14, no. 8, pp. 648–661 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.8.648.661>
- [17] Ionin A.A., Kinyaevsky I.O., Klimachev Yu.M., et al. A wide-range IR laser source (2.5–17 microns) for plasma diagnostics. *Nuclear Physics and Engineering*, 2016, vol. 7, no. 5, pp. 383–390. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2079562916050080>
- [18] Kameyama N., Yoshida H., Fukagawa H., et al. Thin-film processing of polypropylene and polystyrene sheets by a continuous wave CO₂ laser with the Cu cooling base. *Polymers*, 2021, vol. 13, iss. 9, p. 1448. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13091448>
- [19] Rejani A., Hashemzadeh M. CO₂ laser-air cutting of glass-fibrereinforced unsaturated polyester (GFRUP): an experimental investigation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, vol. 117, pp. 2627–2638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07180-6>
- [20] Sherstobitov V.E., Rodionov A.Yu. Laser, slab laser, gas laser (variants) and gas slab laser: no. 2003114580/28. Patent no. 2243620 C1 Russian Federation, IPC H01S 3/063, H01S 3/083. Appl. 05.06.2003, publ. 12.27.2004 (in Russ.). EDN: XAPQZL

[21] Pakhalov V.B. Spectral modes and coherence of a semiconductor laser and a diode-pumped Nd laser near the lasing threshold. *Pisma v ZhTV*, 2010, vol. 36, no. 8, pp. 14–22 (in Russ.). EDN: RCVHYX

[22] Mitronin A.V., Beljaeva T.S., Zhekova A.A. Evaluation of the effectiveness of the use of diode laser and photoactivated therapy in endodontic treatment. *Dentistry*, 2016, vol. 95, no. 6-2, pp. 15–16 (in Russ.). EDN: XWRDAT

Boldyrev V.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Chemistry, Bauman Moscow State Technical University; Head of the Department, Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Belyi V.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Physics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Bogatov N.A. — Researcher, Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Senior Lecturer, Department of Physics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Savina A.S. — Researcher, Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Senior Lecturer, Department of Physics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia; Post-Graduate Student, Department of Innovative Materials and Corrosion Protection, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Zotkin A.P. — Engineer, Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Laboratory Assistant, Department of Physics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Pentyukhin E.I. — Technician, Engineering of Chemical and Technological Systems, Engineering Center Automation and Robotics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Laboratory Assistant, Department of Physics, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Boldyrev V.S., Belyi V.S., Bogatov N.A., et al. Form factor determination methodology at the helium-neon laser design stage. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 4 (115), pp. 35–46 (in Russ.). EDN: UYOOQW