

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-10-24-34

УДК 544.531:667.28

Математическая модель оценивания характеристик слоистого твердотельного лазера на красителях с оптической накачкой активной среды

Виталий Евгеньевич Поляков¹, Александр Владимирович Емельянов²✉,
Владислав Владимирович Ширококов³, Александр Александрович Михайлов⁴

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

¹polyakov1939@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5524-0042>

²slash1@inbox.ru <https://orcid.org/0000-0003-4995-0958>

³17126vlad@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6216-1334>

⁴ol.ichi@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-8791-570X>

Аннотация

Предмет исследования. В работе исследовались подходы к оцениванию инженерно-конструкторских и энергетических характеристик нового типа лазерных систем в виде объёмных цилиндрических и сферических оболочек (слоистых твердотельных лазеров). **Цель работы.** Разработка модели оценивания характеристик слоистого твердотельного лазера, содержащего активные среды, находящиеся в различных агрегатных состояниях. **Метод.** Для описания структуры поля светового пучка, формируемого в резонаторе, и определения апертуры зеркал генерирующего лазерного модуля использовалась известная модель гауссова пучка. Для расчёта выходных характеристик слоистого лазерного модуля использован метод решения классической системы балансных уравнений для четырёхуровневой активной среды. **Основные результаты.** Предложен новый способ конструирования лазерных систем в виде объёмных цилиндрических и сферических оболочек, секционированных лазерными модулями, соприкасающимися боковыми поверхностями. Проведён расчёт резонаторно-оптических и лазерно-динамических характеристик слоистого лазерного модуля, в результате которого получены значения геометрических характеристик резонатора и оптических элементов модуля, пиковые значения мощности импульсов генерации и накачки для случаев, когда источники накачки заполнены азотом или аргоном. **Практическая значимость.** Разработанная математическая модель позволяет путём изменения исходных данных о количестве слоёв и их толщине рассчитать, как структуру светового пучка в резонаторе, так и генерационные характеристики газового и твердотельного модуля в отдельности, а также при их комбинировании (в случае чередования твёрдых слоёв активной среды и газовых слоёв источников накачки).

Ключевые слова: слоистый лазерный модуль, оптическая накачка, активная среда

Благодарность: расчёты лазерно-динамических характеристик слоистого лазерного модуля были проведены с использованием оборудования, приобретённого в рамках Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных — кандидатов технических наук МК-2140.2022.4.

Ссылка для цитирования: Поляков В.Е., Емельянов А.В., Ширококов В.В., Михайлов А.А. Математическая модель оценивания характеристик слоистого твердотельного лазера на красите-

лях с оптической накачкой активной среды // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 24–34.
<http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-24-34>

Код OCIS: 140.3580.

Mathematical model for estimating the characteristics of a layered solid-state dye laser with optical pumping of the active environment

VITALII POLYAKOV¹, ALEKSANDR EMEL'YANOV²✉, VLADISLAV SHIROBOKOV³, ALEKSANDR MIKHAILOV⁴

The Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint-Petersburg, Russia

¹polyakov1939@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-5524-0042>

²slash1@inbox.ru <https://orcid.org/0000-0003-4995-0958>

³17126vlad@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-6216-1334>

⁴lol.ichi@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-8791-570X>

Abstract

Subject of study. The paper investigates the approaches to the evaluation of engineering design and energy characteristics of a new type of laser systems in the form of volumetric cylindrical and spherical shells (layered solid-state lasers). **Aim of study.** Development of a model for evaluating the characteristics of a layered solid-state laser containing active media in various aggregate states. **Method.** The well-known Gaussian beam model was used to describe the structure of the field of the light beam formed in the resonator and to determine the aperture of the mirrors of the generating laser module. To calculate the output characteristics of a layered laser module, the method of solving a classical system of balanced equations for a four-level active medium was used. **Main results.** A new method of designing laser systems in the form of volumetric cylindrical and spherical shells, sectioned by laser modules touching the side surfaces, is proposed. The resonator-optical and laser-dynamic characteristics of the layered laser module are calculated, as a result of which the values of the geometric characteristics of the resonator and the optical elements of the module, peak values of the power of the generation and pumping pulses for cases when the pumping sources are filled with nitrogen or argon are obtained. **Practical significance.** By changing the initial data on the number of layers and their thickness the developed mathematical model allows to calculate both the structure of the light beam in the resonator and the generation characteristics of the gas and solid-state modules separately, as well as when combining them (in the case of alternating solid layers of the active medium and gas layers of pumping sources).

Keywords: layered laser module, the optical pumping, the active environment

Acknowledgment: calculations of the laser-dynamic characteristics of the layered laser module were carried out using the equipment purchased under the Grant from the President of the Russian Federation for state support of postdoctoral researchers in technical sciences MK-2140.2022.4.

For citation: Polyakov V.E., Emel'yanov A.V., Shirobokov V.V., Mikhailov A.A. Mathematical model for estimating the characteristics of a layered solid-state dye laser with optical pumping of the active environment [In Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2023. V. 90. № 10. P. 24–34. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-24-34>

OCIS code: 140.3580.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ научно-технических работ показал, что лазерные устройства и установки различного назначения используются во множестве областей современной науки и техники. Особенностями конкретных устройств является

использование различного типа активной среды, наличие возможности использования оптических усилителей, различные системы накачки [1]. Анализируя геометрические характеристики усилительных элементов лазерных устройств, можно сказать, что наиболее попу-

лярными стали устройства с активными элементами на основе дисков, стержней (цилиндрической и призматической формы), трубок или плит [2].

Поскольку энергия, излучаемая лазером, например, в режиме модулируемой добротности, запасается перед импульсом излучения в активной среде, то на её величину решающее влияние оказывает объём среды. Ограничения по объёму активной среды определяются жёсткими требованиями к оптической однородности, условиям её охлаждения, а также ограниченными возможностями технологии создания активных лазерных элементов больших размеров (длина не менее 1 м, апертура — около 0,75 м). Однако в случае изготовления в перспективе активной среды в виде шара, увеличение его радиуса в 10 раз привело бы к увеличению объёма активной среды в 1000 раз. Создание лазера, у которого активный элемент был бы выполнен в виде шара, представляется проблематичным и сопряжено с большим количеством технологических ограничений. Более реальной является идея создания лазера в виде сферической оболочки.

Целью статьи является разработка модели оценивания характеристик слоистого твердотельного лазера, содержащего активные среды, находящиеся в различных агрегатных состояниях.

В статье впервые обосновывается возможность конструирования лазерных систем в виде объёмных цилиндрических и сферических оболочек, секционированных слоистыми лазерными модулями, в которых увеличение массы активной среды обеспечивается увеличением радиуса оболочки и количеством модулей [3]. Предполагается, что цилиндрическая оболочка может быть использована как оптический источник накачки лазерного элемента, расположенного на оси оболочки и имеющего свой собственный резонатор. Источник накачки в виде цилиндрической оболочки, в отличие от коаксиальных ламп, является когерентным источником, что позволяет получать высокий КПД накачки.

Преимуществом сферической оболочки, секционированной модулями, является то, что система на её основе может быть использована при физических исследованиях процессов в сильных электромагнитных полях, а также при конструировании плазмодинами-

ческих лазеров. В этом случае вдоль одного из диаметров оболочки дополнительно конструируется цилиндрический канал, один конец которого выходит из мишенной камеры, а на другом — установлен оптический резонатор. В канале происходит инжекция лазерной плазмы в виде плазменных струй с последующей релаксацией рабочего уровня за счёт газомеханического механизма охлаждения. Мишень является кумулятивной и в случае заполнения активной средой в виде стронций-гелия длина волны излучения такого лазера составляет 416 нм и 431 нм (синий лазер).

ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ИНЖЕНЕРНО-КОНСТРУКТОРСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТОГО ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ

Под слоистым лазерным модулем понимается устройство, которое состоит из источника накачки и активной среды, размещённой в резонаторе, одно из зеркал которого выпуклым. Активная секционированная среда выполнена в виде двух последовательно расположенных криволинейных слоёв, чередующихся с источниками накачки, которые установлены перпендикулярно оптической оси резонатора и ограничены криволинейными поверхностями второго порядка и боковыми плоскостями [3, 4].

На рис. 1. изображён сферообразный лазерный модуль. Позицией 1 показано «глухое зеркало» оптического резонатора; 2 — криволинейные источники накачки; 3 — криволинейные слои секционированной активной среды; 4 — выходное селективное зеркало оптического резонатора; 5 — генератор импульсов поджига источников накачки. Стрелка условно указывает направление излучения. Представленный на рис. 1 модуль содержит полуконцентрический резонатор. Кроме того, в подобных модулях могут быть использованы конфокальные, полуконфокальные, телескопические и другие типы резонаторов.

Лазерный модуль, в отличие от рассмотренного генерирующего, может быть выполнен как усилительный, у которого второе зеркало также выполнено выпуклым и установлено внутри лазерного модуля так, что оно ограничивает вместе с первым зеркалом, по крайней мере, один слой активной среды и два слоя источника накачки, и образуют задающий генератор.

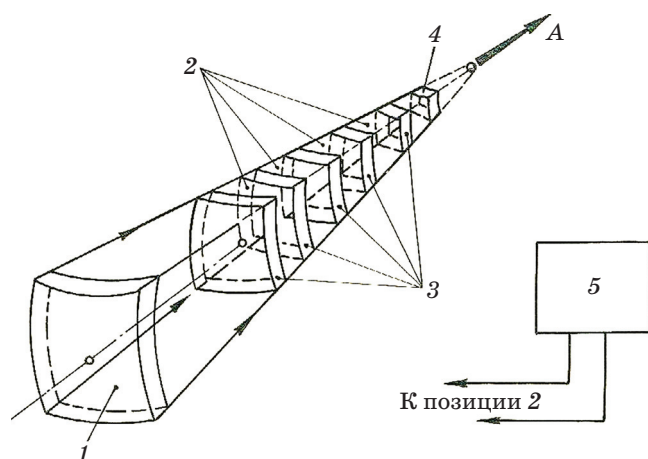


Рис. 1. Сферообразный генерирующий лазерный модуль

Fig. 1. Spherical generating laser module

Примыкающие к выходному зеркалу чередующиеся слои активной среды и источников накачки являются квантовыми усилителями. Потребность в усилительных лазерных модулях определяется задачами формирования профилированных импульсов (с заданным спектром и формой импульса), что достигается формированием импульса в задающем генераторе с последующим его усилением [4, 5, 13].

В рассматриваемом случае активная среда выполняется из эпоксиполимерной матрицы, активированной органическими красителями, в которой процесс полимеризации осуществлён за счёт взаимодействия между эпоксидными олигомерами и поверхностью стеклянных порошков, содержащих функциональные группы [6]. Такие лазеры являются широкополосными и перестраиваемыми и могут использоваться при решении задач спектрометрии, в частности, фотокolorиметрии. В самом общем случае среда может быть выполнена из неодимового стекла, граната, алесандрита и др.

Источники накачки лазерного модуля выполняются в виде криволинейных полостей, заполненных инертными газами, например, аргоном или азотом, которые чередуются со слоями активной среды. В общем случае источник накачки выбирают в зависимости от используемой активной среды, чтобы обеспечить излучение света, по спектру совпадающее с полосой поглощения активной среды. Объём источника накачки рассчитывают из

условий достижения критической инверсии населённости.

В лазерном модуле могут быть реализованы две схемы электрической накачки:

- продольная схема, когда электроды нанесены в виде токопроводящей сетки на поверхности криволинейных слоёв активной среды, что обеспечивает одинаковый разрядный промежуток;
- поперечная схема, при которой электрическое поле, приложенное к полостям, заполненным аргоном (азотом), перпендикулярно направлению распространения вынужденного излучения.

В лазерном модуле (рис. 1) параметры зеркал резонатора (позиции 1 и 4) рассчитываются только исходя из генерационных характеристик активной среды. Однако с целью увеличения эффективной длины прохода в два раза и уменьшения расходимости светового пучка (которая определяется отношением поперечного размера разрядного промежутка к удвоенной длине резонатора) зеркало 1 выполняют «глухим» для λ_{gen} активной среды лазерного модуля, а зеркало 4 — селективным. Использование азота как источника накачки эффективно в случае, если слои активной среды выполнены «тонкими» или, если линия азота ($\lambda_{gen} = 337$ нм) поглощается генерирующими центрами, а эпоксиполимерная матрица для указанной линии является достаточно прозрачной.

Если слои среды выполнены «толстыми» и матрица эффективно поглощает длину волны 337 нм, то в качестве источника накачки необходимо использовать аргон, ксенон или увеличить прозрачность матрицы в области ближнего ультрафиолетового излучения.

РАСЧЁТ РЕЗОНАТОРНО-ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТОГО ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ

Прежде чем оценить генерационные возможности лазерного модуля в режиме ионизации газа (например, азота и аргона), необходимо рассчитать структуру поля в резонаторе. Для этого осуществим максимизацию объёма основной моды резонатора предварительно без учёта слоёв эпоксиполимерной матрицы с красителем.

За основу для расчёта примем квазиконцентрический резонатор с перетяжкой вне

резонатора. В процессе решения произведём изменение радиусов зеркал с целью увеличения объёма основной моды резонатора при соблюдении условий:

а) $0 < g_1 g_2 < 1$ — условие устойчивости резонатора;

б) $z_0 > 0$ — положение перетяжки моды вне резонатора.

В основе математического описания физических процессов, протекающих в резонаторе, в частности, особенностей структуры поля светового пучка, лежит модель гауссова пучка, которая также применяется при расчёте апертур зеркал генерирующего лазерного модуля. Такие пучки характеризуются быстрым спадом амплитуды поля по мере увеличения расстояния от оси пучка:

$$u = A \exp(-x^2 / \rho^2),$$

где u — функция, определяющая свойства лазерного пучка, A — значение амплитуды поля, x — расстояние вдоль по оси пучка, ρ — эффективный радиус пучка. Активная среда изготовлена из активированного эпоксиолимера, коэффициент преломления которого $n = 1,501$. В качестве активатора примем родамин Ж с длиной волны излучения $\lambda_{\text{ген}} = 5,8 \times 10^2$ нм. Базу резонатора L примем равной 1000 мм.

Рассмотрим продольную структуру поля, принимая во внимание условие устойчивости резонатора $0 \leq g_1 g_2 \leq 1$.

Для рассматриваемого случая

$$g_1 = 1 - L / R_1 = 1 - 1000 / 1300 = 0,23, \quad (1)$$

$$g_2 = 1 - L / R_2 = 1 + 1000 / 306 = 4,27, \quad (2)$$

где радиус «глухого» зеркала $R_1 = 1300$ мм, а радиус выходного зеркала $R_2 = -306$ мм, тогда

$$g_1 g_2 = 0,985, \quad (3)$$

Рассматриваемый резонатор является устойчивым. На основе методики эквивалентного конфокального резонатора (ЭКР) [7, 8] радиус кривизны зеркал ЭКР R_e определяется как

$$R_e = \frac{2L [g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)]^{1/2}}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2}. \quad (4)$$

При принятых ранее численных значениях $R_e = 96,25$ мм.

Для определения размера пятна в любом сечении пучка сначала находится минимальный размер пятна в плоскости симметрии ω_0 , то есть размер перетяжки для основной моды в центральной плоскости резонатора:

$$2\omega_0 = 2(\lambda L / 2\pi n)^{1/2} = 0,15 \text{ мм}. \quad (5)$$

Положение перетяжки относительно «глухого» зеркала определяется из выражения

$$z_1 = \frac{L g_2 (1 - g_1)}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2} = 1298 \text{ мм}. \quad (6)$$

Положение перетяжки относительно селективного зеркала определяется из выражения

$$z_2 = L \frac{g_1 (1 - g_2)}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2} = 213 \text{ мм}. \quad (7)$$

Учитывая вышесказанное, можно получить следующие соотношения для диаметров пятен на зеркалах

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \sqrt[4]{\frac{g_2}{g_1} \frac{1}{1 - g_1 g_2}}, \quad (8)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \sqrt[4]{\frac{g_1}{g_2} \frac{1}{1 - g_1 g_2}}. \quad (9)$$

Продольное изменение диаметра пучка определяется выражением

$$2\omega_z = 2\omega_0 (1 + \xi^2)^{1/2}, \quad (10)$$

а радиус кривизны волнового фронта определяется соотношением

$$R = \left| \frac{1 + \xi^2}{2\xi} \right| R_e, \quad (11)$$

где

$$\xi = 2z_1 / R_e, \quad (12)$$

где ξ — относительная координата сечения пучка от плоскости перетяжки.

Для определения продольной структуры поля были использованы уравнения (9–11).

График, иллюстрирующий результаты расчёта структуры поля в резонаторе, представлен на рис. 2. С учётом изменения показателя преломления ($n = 1,501$) при выходе из активной среды $R'_e = R_e n^{-1}$ и $2\omega'_z = 2\omega_z$.

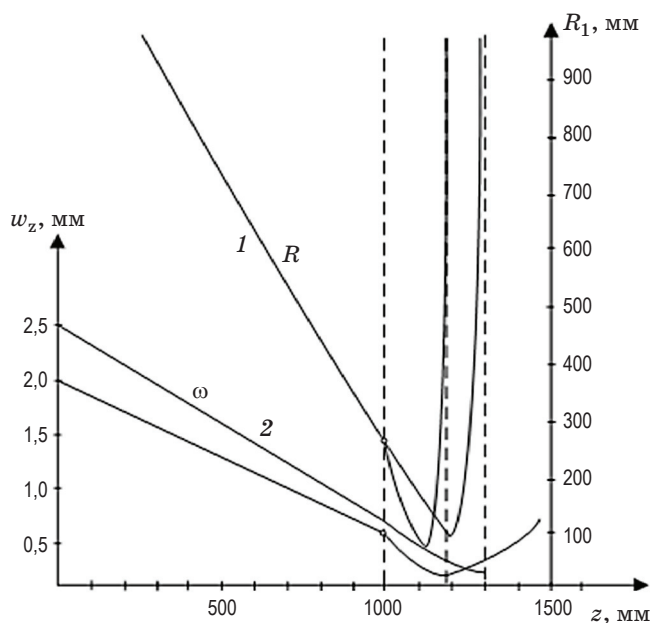


Рис. 2. Графики зависимостей характеристик поля в резонаторе без учёта «выхода» в воздух (кривая 1), с учётом «выхода» в воздух (кривая 2)
Fig. 2. Diagram of the dependences of the field characteristics in the resonator without taking into account «the exit» into the air (curve 1), taking into account «the exit» into the air (curve 2)

Расстояние от выходного зеркала до перетяжки

$$z'_2 = z_2 / n = Lg_1(1 - g_2) / (g_1 + g_2 - 2g_1g_2)n = 186 \text{ мм.} \quad (13)$$

Результаты расчёта послужили основой для построения графиков на рис. 3. Прямые на рис. 3а иллюстрируют значения относительной координаты сечения пучка ξ в зависимости от расстояния до «глухого» зеркала путём последовательного изменения радиусов кривизны зеркал R_1, R_2 с выбранной дискретностью для семи различных вариантов (позиции 1–7 соответствуют расстояниям до «глухого» зеркала 600, 550, 520, 510, 505, 503, 501 мм) при постоянной базе резонатора (1000 мм) и расстоянии до выходного зеркала (1298 мм).

Поперечная структура поля при квадратных зеркалах может быть записана с помощью выражения (14) [9]

$$U_{ml}(x, y) = H_m H_l \exp[-(\pi / L\lambda)(x^2 + y^2)], \quad (14)$$

где H_m и H_l — полиномы Эрмита m -го и l -го порядков соответственно.

Для моды TEM_{00} ($m = l = 0$) собственное решение записывается в виде

$$U_{00}(x, y) = \exp[-\pi(x^2 + y^2) / L\lambda]. \quad (15)$$

Для вышеуказанной моды характерно гауссово распределение как при движении по оси

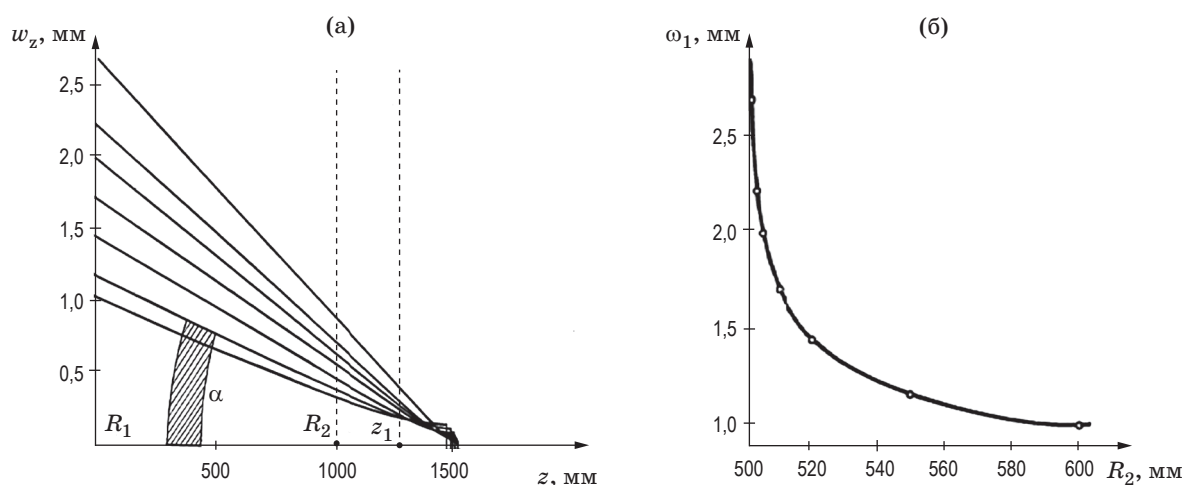


Рис. 3. Графики зависимости относительной координаты сечения пучка от расстояния до «глухого» зеркала (а), диаметра пучка от радиуса выходного зеркала (б)

Fig. 3. Dependency diagrams of (a) relative coordinate of the beam section from the distance to the «blind» mirror, (b) beam diameter from the radius of the output mirror

абсцисс, так и по оси ординат. Модовая картина при таком распределении представлена пятном в форме круга на зеркале.

Собственное решение для моды TEM_{01} ($m = 0, l = 1$) записывается в виде

$$U_{00}(x, y) = \exp[-\pi(x^2 + y^2)/L\lambda].$$

Размеры зеркал выбирают исходя из:

а) наибольшего коэффициента заполнения активной среды;

б) минимальных дифракционных потерь для основной моды и максимальной разности потерь для основной и высших мод.

Коэффициент расширения пучка при переходе от TEM_{00} к TEM_{01} $K_M = 1,52$. Поэтому, если для TEM_{00} при $\alpha = \omega$ внутри апертуры зеркала находится 95,5% энергии, то для TEM_{01} — 81,5%, т.е. потери возрастают в 4 раза. Расчёт проведён исходя из числа Френеля для $F = \alpha^2/\lambda L$.

При $\alpha = \omega$ увеличение потерь при переходе $TEM_{00} \rightarrow TEM_{01}$ возрастает в 2,5 раза ($F_1 = 7, F_2 = 1$). Условие наибольшего заполнения и одинаковых потерь на обоих зеркалах имеют вид

$$2\alpha_1 / \omega_1 = 2\alpha_2 / \omega_2. \quad (16)$$

Если $2\alpha_1 = 4,2$ мм, то $2\alpha_2 = 0,94$ мм. Таким образом, зеркала соответственно должны иметь размеры $4,2 \times 4,2$ мм и $0,94 \times 0,94$ мм. При этих условиях потерями для основной моды можно пренебречь и её поперечную структуру можно рассчитать по формуле (15).

С целью оптимизации геометрических параметров резонатора были проведены расчёты, приведённые в табл. 2.

Для расчёта структуры поля в резонаторе с учётом слоёв эпоксиполимерной матрицы с красителем необходимо задать соотношение объёмов газовой среды и эпоксиполимерной матрицы с красителем, а также толщину слоёв, которая определяется из условия однородного облучения прямой и обратной волной возбуждающего излучения.

Исходные данные по объёму азота рассчитывались на основе известной концентрации молекул красителя в эпоксиполимерной матрице $N_{cr} \approx 10^{18}$ см⁻³ и оптимальной энергии, требуемой для накачки объёма $V_{cr} = 1$ см³ активной среды, равной $E_1 = h\nu_1 N_{cr} V_{cr} = 0,59$ Дж.

Таким образом, объём азота $V_{N_2} = E_1 / W_{cr}^{N_2} = 0,3 \times 10^3$ см³, где $\lambda_1 = 337$ нм, $W_{sr}^{N_2} = 2$ мДж см⁻³, а $V_{cr} / V_{N_2} = 1:300$.

Толщина слоя определялась для поглощающей эпоксиполимерной матрицы с пропусканием $\tau_\lambda = 35\%$ и составляла 1 см в случае, если газовую часть модуля составлял азот. Максимизация объёма основной моды резонатора также осуществлялась без учёта слоёв матрицы с красителем.

РАСЧЁТ ЛАЗЕРНО-ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОИСТОГО ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ

Расчёт выходных характеристик перспективного лазерного модуля производится на основе решения дифференциальных уравнений для активной среды с четырьмя уровнями [9]. Балансные уравнения для расчёта генерационных характеристик красителя в эпоксиполимерной матрице имеют вид

$$N_1 + N_2 + N_T = N_t, \quad (17)$$

$$\dot{N}_1 = W_p N_1 + (B_\alpha N_1 - B_e N_2) q - (N_2 / \tau), \quad (18)$$

$$\dot{N}_2 = K_{ST} N_2 - (N_T / \tau_T), \quad (19)$$

$$\dot{q} = [V_a (B_e N_2 - B_a N_1 - B_T N_T) - (1 / \tau_C)] q, \quad (20)$$

где N_t — концентрация молекул красителя.

Коэффициенты вынужденных переходов рассчитываются с помощью выражений:

$$B_a = \sigma_a C / V_a, \quad B_e = \sigma_e C / V_a, \quad (21)$$

$$B_T = \sigma_T C / V_a,$$

где $\sigma_{a,e,T}$ — сечение поглощения излучения соответствующего перехода; V_a — объём моды резонатора; $1/\tau = 1/\tau_{sp} + K_{ST}$, где τ_{sp} — время спонтанной релаксации; K_{ST} — сечение перехода из синглетной моды в триплетную; $1/\tau_C$ — потери, несвязанные с уровневой структурой; W_p — скорость накачки; B_a, B_e, B_T — сечения переходов.

Процесс поглощения характеризуется переходом фотонов с самых нижних уровней состояния S_0 в состояние S_1 , а излучение — переходом с самых нижних уровней состояния S_1 в состояние S_0 .

В уравнениях (21) представлены коэффициенты, характеризующие вынужденные переходы на один фотон в моде: коэффициент B_a характеризует поглощение, а B_e — излучение перехода $S_0 \rightarrow S_1$. При этом $B_a \neq B_e$, так как эти коэффициенты относятся к разным переходам. Коэффициент B_T относится к переходу $T_1 \rightarrow T_2$.

В уравнении (19) не учитываются переходы $T_1 \rightarrow T_2$ ввиду предположения о том, что время жизни τ_T перехода $T_2 \rightarrow T_1$ существенно меньше времени установления теплового равновесия между двумя полосами ($B_T N_T = N'_T / \tau'_T$, где N'_T — населённость полосы состояния T_2).

В уравнении (17) N_t — полное число активных молекул. В уравнении (18) произведение $W_p N_1$ характеризует накачку. В случае, когда полоса поглощения накачки пуста, скорость роста населённости верхнего уровня пропорциональна населённости основного уровня N_1 [9]. В уравнениях (18) и (20) q — полное число фотонов в резонаторе.

Особенность режима свободной генерации с импульсной накачкой заключается в том, что количество потерь не зависит от интенсивности излучения.

Значение скорости накачки W_p оценивалось исходя из того, что в эпоксиполимерную матрицу, активированную красителем, за время Δt введено количество фотонов возбуждающего излучения, равное значению концентрации молекул красителя N_{cr} [10, 11]. При этом количество молекул, возбуждённое к переходу на верхний уровень, равно $0,9 N_{cr}$, т.е.

$$\Delta t W_p N_{cr} = 0,9 N_{cr}.$$

Значение N_{cr} фотонов соответствует энергии

$$E = 5,88 \times 10^{-19} N_{cr} \text{ Дж.}$$

Соответственно для мощности будет иметь

$$P = 5,88 \times 10^{-19} N_{cr} / \Delta t.$$

Тогда $\Delta t W_p P N_{cr} = 0,9 N_{cr}$ и $5,88 \times 10^{-19} N_{cr} W_p = 0,9$, отсюда $W_p = 0,9 / 5,88 \times 10^{-19} N_{cr}$. При $N_{cr} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, получаем $W_p = 1,53 \text{ с}^{-1}$.

Генерационные характеристики модуля рассчитываются путём решения уравнений (17)–(20). Исходные данные по характери-

кам эпоксиполимерной матрицы с красителем представлены ниже:

1) показатель преломления — 1,501; длина волны излучения — 580 нм, суммарный объём матрицы — $0,5735 \text{ см}^3$; толщина слоя — 1 см; количество слоёв — 5;

2) характерные времена: $T = 0,5 \times 10^{-8} \text{ с}$, $T_{SP} = 0,52 \times 10^{-8} \text{ с}$, $T_T = 0,11 \times 10^{-6} \text{ с}$;

3) сечения поглощения $\sigma_a = 0,5 \times 10^{-18} \text{ см}^2$; $\sigma_e = 0,1 \times 10^{-15} \text{ см}^2$; $\sigma_T = 0,49 \times 10^{-16} \text{ см}^2$.

Импульс накачки характеризуется следующими параметрами:

- пиковая мощность — $0,1106 \times 10^8 \text{ Вт}$,
- длительность импульса — $0,16 \times 10^{-8} \text{ с}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчёт резонаторно-оптических характеристик слоистого лазерного модуля проведён с применением программно-алгоритмического комплекса [12]. Результаты расчёта проиллюстрированы рис. 4 и 5.

При расчёте резонаторно-оптических характеристик слоистого лазерного модуля были получены следующие параметры резонатора [14], представленные в табл. 1.

Координаты и радиусы кривизны слоёв приведены в табл. 2.

При использовании в качестве источника накачки аргона, исходные данные по его

Таблица 1. Результаты расчёта параметров резонатора

Table 1. Results of calculation of the resonator parameters

№ п/п	Параметры резонатора	Численные значения параметров
1	Длина резонатора, см	100
2	Радиусы зеркал, см	131 и -47
3	Диаметры зеркал, см	0,44 и 0,16
4	Коэффициенты пропускания зеркал	0,1 и 0,5
5	Объём основной моды, см^3	6,7
6	Расстояние до перетяжки, см	46,03
7	Диаметр перетяжки, см	0,022
8	Суммарный объём матрицы, см^3	3,38
9	Толщина слоя, см	2
10	Количество слоёв	23

Таблица 2. Результаты расчёта радиуса кривизны и координат слоёв сферического лазерного модуля
Table 2. Results of calculation of radius of curvature and coordinates of layers of spherical laser module

Номер слоя	Координата, см (азот)	Радиус кривизны, см (азот)	Координата, см (аргон)	Радиус кривизны, см (аргон)
1	9,5	11	1,174	22,91
	10,5	11,86	3,174	24,91
2	29,5	29,98	5,522	27,26
	30,5	30,97	7,522	29,26
3	49,5	49,79	9,87	31,61
	50,5	50,78	11,87	33,61
4	69,5	69,71	14,22	35,66
	70,5	70,70	16,22	37,96
5	89,5	89,66	18,57	40,30
	90,5	90,66	20,57	42,30

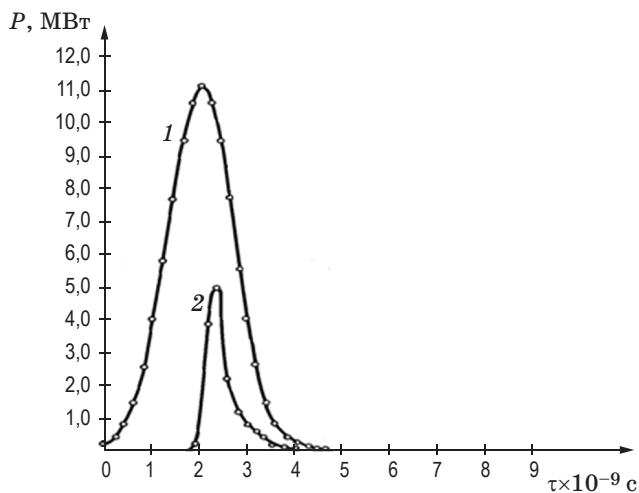


Рис. 4. Графики временных зависимостей мощности импульса накачки (1) и импульса генерации (2) лазерного модуля, в котором газовая часть модуля содержит молекулярный азот

Fig. 4. Diagrams of time dependences of the power of the pump pulse (1) and the generation pulse of a laser module (2), in which the gas part of the module contains molecular nitrogen

объёму рассчитывались с учётом заданной концентрации молекул $N_{cr} \approx 10^{18} \text{ см}^3$ и оптической энергии $E_1 = h\nu_1 N_{cr} V_{cr} = 0,372 \text{ Дж}$, требуемой для накачки 1 см^3 красителя. Принимая во внимание то, что $\lambda_1 = 534 \text{ нм}$, $V_{Ar} = E_1 / W_{sr}^{Ar} = 0,25 \text{ см}^3$, где $W_{sr}^{Ar} = 1,5 \text{ Дж см}^{-3}$, получим $V_{cr} / V_{Ar} = 1:0,25$.

Результаты расчёта лазерно-динамических характеристик слоистого лазерного модуля

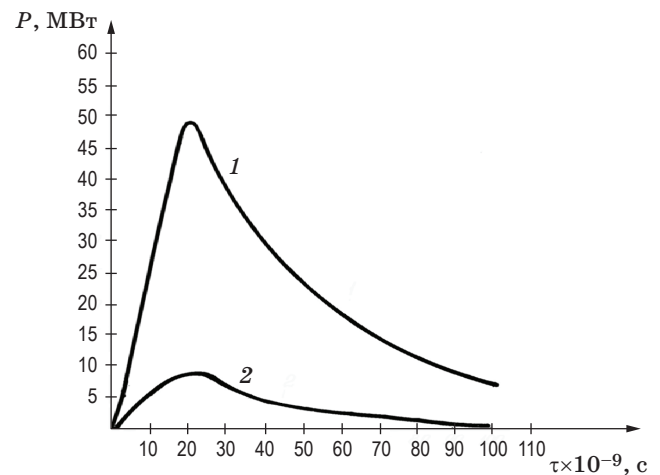


Рис. 5. Графики временных зависимостей мощности импульса накачки (1) и импульса генерации (2) лазерного модуля, в котором газовая часть модуля содержит аргон

Fig. 5. Diagrams of time dependences of the power of the pump pulse (1) and the generation pulse of a laser module (2), in which the gas part of the module contains argon

в случае, если газовая часть модуля содержит азот (N_2), приведены на рис. 4.

Пиковая мощность излучения лазерного модуля при этом равна $0,7705 \times 10^7 \text{ Вт}$, энергия импульса излучения в режиме свободной генерации — $0,289 \times 10^{-2} \text{ Дж}$, энергия импульса накачки — $0,1935 \times 10^{-1} \text{ Дж}$.

Параметры слоистого лазерного модуля для газовой части, содержащей аргон (Ar_2), представлены в табл. 3 и на рис. 5.

Таблица 3. Результаты расчёта характеристик лазерного модуля

Table 3. Results of calculation of the laser module characteristics

№ п/п	Энергетические параметры	Численные значения характеристик
1	Пиковая мощность импульса накачки, Вт	$0,505 \times 10^8$
2	Энергия импульса накачки, Дж	2,262
3	Длительность импульса накачки, с	$0,1 \times 10^{-6}$
4	Пиковая мощность излучения, Вт	$0,8779 \times 10^7$
5	Энергия импульса излучения, Дж	0,3967

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработана математическая модель оценивания характеристик слоистого твердотельного лазера, содержащего активные среды, находящиеся в различных агрегатных состояниях, которая позволяет путём изменения количества слоёв и их толщины рассчитать как структуру поля в оптическом резонаторе модуля, так и генерационные характеристики модуля в случаях, когда слой активной

среды выполнены из эпоксиполимерной матрицы, активированной красителями, а слой источников накачки заполнены азотом или аргоном.

Предложен новый способ конструирования лазерных систем в виде объёмных цилиндрических и сферических оболочек, секционированных лазерными модулями, соприкасающимися боковыми поверхностями. В таких лазерных средах объём активной среды практически не ограничен и зависит от длины лазерного модуля, что обеспечивает возможность накопить большое количество энергии перед импульсом излучения.

Лазерная установка на основе секционированных модулей будет являться многопучковой по отношению к мишени, расположенной в реакторе, внутри сферической оболочки и может представлять интерес при проведении исследований по нагреву и абляционному сжатию сферических мишеней, внутри которых размещены различные вещества [15].

Предложенная математическая модель и способ построения слоистого лазерного модуля могут быть использованы и в случае, когда активная среда выполнена из стекла, активированного редкоземельными металлами, а в качестве источника накачки использован ксенон или криптон.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасьев Ю.В., Завестовская И.Н., Зворыкин В.Д., Ионин А.А., Сенатский Ю.В., Стародуб А.Н. Международный форум «Современные мощные лазеры и их применения» (ALPHA'99) // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 5. С. 462–470. <https://doi.org/10.1070/QE2000v030n05ABEH001744>
2. О'Ши Д., Коллен Р., Родс У. Лазерная техника. М.: Атомиздат, 1980. 256 с.
3. Поляков В.Е. Лазерный модуль. Цилиндрические и сферические оболочки, секционированные модулями // А. с. № 190916. 1983.
4. Справочник по лазерам / Под ред. А.М. Прохорова. В 2-х томах. Т. 1. М.: Сов. Радио, 1978. 504 с.
5. Горбунова Ю.А. Существование периодических режимов некоторых оптических квантовых генераторов // Труды Средневолжского математического общества. 2008. Т. 10. № 1. С. 126–131.
6. Поляков В.Е., Шосталь В.Ю., Закутаев А.А., Ширококов В.В. Активная среда для волоконных лазеров и способ ее изготовления // Патент РФ № 2715085. Бюл. № 6. 25.02.2020.
7. Розанов Н.Н., Федоров Э.Г. Влияние частотных расстройек и вида начального распределения поля на параметрическую генерацию излучения в динамическом резонаторе // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 5. С. 855–859. <https://doi.org/10.7868/S003040341605024X>

REFERENCES

1. Afanas'ev Yu.V., Zavestovskaya I.N., Zvorykin V.D., Ionin A.A., Senatskii Yu.V., Starodub A.N. International forum on advanced high-power lasers and applications ALPHA'99 // Quantum Electron. 2000. V. 30. № 5. P. 462–469. <https://doi.org/10.1070/QE2000v030n05ABEH001744>
2. O'Shea D.C., Callen W.R., Rhodes W.T. Introduction to lasers and their applications. M: Atomizdat, 1980. 256 p.
3. Polyakov V.E. Laser module. Cylindrical and spherical shells sectioned by modules // Author's dating № 190916. 1983.
4. Handbook of lasers / Ed. by A.M. Prokhorov. In 2 v. V. 1. M.: Sov. Radio, 1978. 504 p.
5. Gorbunova Ju.A. Existence of periodic modes of some optical quantum generators // Proceedings of the Middle Volga Mathematical Society. 2008. V. 10. № 1. P. 126–131.
6. Polyakov V.E., Shostal' V.Yu., Zakutaev A.A., Shirobokov V.V. The active medium for fiber lasers and technology for production thereof // Patent RF № 2715085. Bul №6. 25.02.2020.
7. Rozanov N.N., Fedorov E.G. Influence of frequency detunings and form of the initial field distribution on parametric generation of radiation in a dynamic cavity // Optics and Spectroscopy. 2016. V. 120. № 5. P. 803–807. <https://doi.org/10.7868/S003040341605024X>

8. Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие: Учебное пособие. СПб.: Изд-во «Лань», 2016. 304 с.
9. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 558 с.
10. Каталог активных лазерных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений / Под. ред. акад. Степанова Б.И. Минск: ИФАН БССР, 1977. 237 с.
11. Катаркевич В.М., Рубинов А.Н., Эфендиев Т.Ш. Зависимость поляризационно-энергетических характеристик излучения РОС-лазера на основе пространственной решетки дихромизма усиления от уровня накачки и геометрических условий возбуждения активной среды // Квантовая электроника. Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. Минск. 18–21 нояб. 2013. С. 90–91.
12. Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф. УФ генерация в азоте при накачке объёмным разрядом, иницируемым пучком электронов лавин // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 12. С. 1107–1111. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n12ABEH014112>
13. Дианов Е.М. Карпов В.И., Курков А.С., Протопопов В.Н. Методы сглаживания спектра усиления эрбиевых волоконных усилителей // Квантовая электроника. 1996. Т. 26. № 12. С. 1029–1034. <https://doi.org/10.1070/QE1996v026n12ABEH000866>
14. Поляков В.Е., Ширококов В.В., Закутаев А.А., Михайлов А.А., Петрушенко В.М., Рогачев В.А., Мерзляков М.А. Программно-алгоритмический комплекс расчета спектральной эффективности и КПД оптической накачки твердотельных слоистых лазеров // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619589. 19.07.2019.
15. Бельков С.А., Бондаренко С.В., Вергунова Г.А., Гаранин С.Г., Гуськов С.Ю., Демченко Н.Н., Доскоч И.Я., Кучугов П.А., Змитренко Н.В., Розанов В.Б., Степанов Р.В., Яхин Р.А. Термоядерные мишени прямого облучения лазерным импульсом мегаджоульного уровня // Журнал экспериментальной и технической физики. 2015. Т. 148. Вып. 4 (10). С. 784–798. <https://doi.org/10.1134/S1063776115100167>
8. Boreisho A.S., Ivakin S.V. Lasers: appliance and action: Study guide. SPb: Lan Publishing House, 2016. 304 p.
9. Svelto O. Principles of lasers. M.: Mir, 1990. 558 p.
10. Catalog of active laser media based on solutions of organic dyes and related compounds / Ed. by acad. Stepanov B.I. Minsk: IPAS BSSR, 1977. 237 p.
11. Katarkevich V.M., Rubinov A.N., Efendiev T.Sh. Dependence of the polarization-energy characteristics of the ROS-laser radiation based on a spatial lattice of the gain dichromism on the pump level and geometric conditions of excitation of the active medium // Quantum Electronics: Materials of IX Internat. scient.-techn. conf. Minsk. 18–21 Nov. 2013. P. 90–91.
12. Baksht E.K., Burachenko A.G., Tarasenko V.F. Lasing in nitrogen pumped by a runaway-electron-preionised diffuse discharge // Quantum Electronics. 2009. V. 39. № 12. P. 1107–1111. <https://doi.org/10.1070/QE2009v039n12ABEH014112>
13. Dianov E.M., Karpov V.I., Kurkov S.A., Protopopov V.N. Methods for flattening the gain spectrum of erbium fibre amplifiers // Quantum Electronics. 1996. V. 26. № 12. P. 1029–1034. <https://doi.org/10.1070/QE1996v026n12ABEH000866>
14. Polyakov V.E., Shirobokov V.V., Zakutaev A.A., Mikhailov A.A., Petruschenko V.M., Rogachev V.A., Merzlyakov M.A. Software-algorithmic complex for calculating the spectral efficiency and efficiency of optical pumping of solid-state layered lasers // Certificate of state registration of the computer program № 2019619589. 19.07.2019.
15. Bel'kov S.A., Bondarenko S.V., Garanin S.G., Vergunova G.A., Gus'kov S.Y., Demchenko N.N. Doskoch I.Y., Rozanov V.B., Stepanov R.V., Yakhin R.A., Zmitrenko N.V. Thermonuclear targets for direct-drive ignition by a megajoule laser pulse // Journal of experimental and theoretical physics. 2015. V. 121. № 4. P. 686–698. <https://doi.org/10.1134/S1063776115100167>

АВТОРЫ

Виталий Евгеньевич Поляков — доктор техн. наук, старший научный сотрудник, профессор, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 16442440600, <https://orcid.org/0000-0001-5524-0042>, polyakov1939@mail.ru

Александр Владимирович Емельянов — канд. техн. наук, начальник лаборатории, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57219593594, <https://orcid.org/0000-0003-4995-0958>, slash1@inbox.ru

Владислав Владимирович Ширококов — канд. техн. наук, начальник лаборатории, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57217989186, <https://orcid.org/0000-0001-6216-1334>, 17126vlad@gmail.com

Александр Александрович Михайлов — младший научный сотрудник, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57215303296, <https://orcid.org/0000-0002-8791-570X>, lol.ichi@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 30.03.2023
Одобрена после рецензирования 13.06.2023
Принята к печати 18.08.2023

AUTHORS

Vitaliy E. Polyakov — D.Sci., Professor, Senior Researcher, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 197198, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 16442440600, <https://orcid.org/0000-0001-5524-0042>, polyakov1939@mail.ru

Aleksandr V. Emel'nov — PhD, Head of Laboratory, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 197198, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57219593594, <https://orcid.org/0000-0003-4995-0958>, slash1@inbox.ru

Vladislav V. Shirobokov — PhD, Head of Laboratory, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 197198, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57217989186, <https://orcid.org/0000-0001-6216-1334>, 17126vlad@gmail.com

Aleksandr A. Mikhailov — Junior Research Assistant, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, 197198, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57215303296, <https://orcid.org/0000-0002-8791-570X>, lol.ichi@yandex.ru

The article was submitted to the editorial office 30.03.2023
Approved after review 13.06.2023
Accepted for publication 18.08.2023