

КОМПАКТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ НА 1,531 МКМ НА КРИСТАЛЛЕ $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ С ВКР-САМОПРЕОБРАЗОВАНИЕМ И ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Введение

Известно [1], что спектральная область 1,52 – 1,6 мкм привлекает разработчиков различных лазерных приборов по ряду причин.

Наиболее удобными в производстве и эксплуатации являются лазеры на полтора микрона с излучателями на вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР-излучателями) [2]. В связи с этим актуальны проблемы совершенствования оптических элементов ВКР-лазеров.

Комбинационное рассеяние (КР) света (эффект Рамана) – неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества (твердого, жидкого или газообразного), сопровождающееся заметным изменением частоты излучения [3].

Цель статьи – моделирование лазерного излучателя для генерации импульсов на длине волны 1,531 мкм. Для достижения поставленной цели была разработана методика расчетов параметров такого излучателя.

1. Конструкция лазерного ВКР-излучателя

В [2] установлены преимущества твердотельных лазерных излучателей с ВКР-самопреобразованием, пассивной модуляцией добротности кристаллом $\text{YAG}:\text{V}^{3+}$, поперечной диодной накачкой и плоско-параллельным резонатором относительно других источников монохроматического излучения, работающих в безопасной для зрения спектральной области излучения. Отмечена перспективность кристалла $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$, вырезанного по оси (010), в приложении лазеров с ВКР-самопреобразованием.

За основу разрабатываемого лазерного ВКР-излучателя взята известная полностью твердотельная конструкция, включающая призму полного внутреннего отражения и юстировочные клинья, поскольку ее можно легко модифицировать в выбранный нами излучатель, она обеспечивает стабильную генерацию основной поперечной моды лазерного излучения в широком диапазоне температур окружающей среды, является компактной и выпуск большинства ее деталей налажен в Украине.

ВКР наиболее эффективно для первой стоксовой компоненты, то есть для первого дискретного смещения длины волны основного излучения в длинноволновую область спектра на частоту, которая зависит от ВКР-среды. В выбранном нами кристалле $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ при накачке ионы неодима излучают несколько линий излучения, при этом на втором месте по интенсивности стоит излучение с $\lambda_{excite} = 1,351$ мкм (соответствующей переходу ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ ионов неодима), которое в кристалле-матрице PbMoO_4 с частотой КР моды $\nu_R = 871$ см⁻¹ [4] при достаточной интенсивности вследствие ВКР преобразуется в нужное нам излучение с $\lambda_{signal} = 1,531$ мкм:

$$\nu_R = \frac{1}{\lambda_{excite}} - \frac{1}{\lambda_{signal}}. \quad (1)$$

2. Методика расчета зеркал резонатора и просветляющих покрытий оптических элементов излучателя

Для наибольшей эффективности ВКР и, следовательно, наибольшей выходной пиковой мощности ВКР-излучения выходное и глухое зеркала резонатора должны иметь максимальные коэффициенты отражения для основного (возбуждающего) излучения с $\lambda = 1,351$ мкм, а для первой стоксовой компоненты (сигнального излучения) с $\lambda = 1,531$ мкм зеркала резонатора должны иметь классические коэффициенты отражения: глухое зеркало должно иметь максимальный коэффициент отражения, выходное зеркало должно быть полупрозрачным [5]. Просветляющие покрытия оптических элементов, находящихся внутри резонатора, должны иметь минимальный коэффициент отражения и для возбуждающего, и для сигнального излучения с $\lambda = 1,351$ мкм и $\lambda = 1,531$ мкм соответственно, а просветляющие покрытия оптических элементов, находящихся вне резонатора, должны иметь минимальный коэффициент отражения только для сигнального излучения с $\lambda = 1,531$ мкм.

Для расчета зеркал резонатора и просветляющих покрытий оптических элементов излучателя применялся матричный метод расчета многослойных диэлектрических покрытий, которые еще называют интерференционными покрытиями, многослойниками или одномерными фотонными кристаллами. Рассмотрим этот метод для случая нормального падения излучения на поверхность интерференционного покрытия, состоящего из непоглощающих материалов и граничащего с непоглощающими полубесконечными однородными средами. Базовой структурой для исследования многослойных систем является однородный диэлектрический слой (магнетодиэлектрическая пленка). Характеристическую матрицу однородного диэлектрического слоя можно представить следующим образом:

$$m = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot n \cdot d\right) & -\frac{i}{n} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot n \cdot d\right) \\ -i \cdot n \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot n \cdot d\right) & \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot n \cdot d\right) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где λ_0 – длина волны излучения в вакууме; n – показатель преломления света с λ_0 материалом, из которого изготовлен данный слой; d – геометрическая толщина данного слоя; i – мнимая единица.

Если рассматривается многослойная среда, состоящая из N слоев с известными характеристическими матрицами m_j (j – номер слоя на пути следования излучения), то матрица всей среды может быть представлена в виде произведения матриц отдельных слоев:

$$M = \prod_{j=1}^N m_j, \quad (3)$$

$$M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Коэффициенты прохождения и отражения света с λ_0 для слоистой среды, граничащей с двух сторон с полубесконечными однородными средами, выражаются через элементы характеристической матрицы всей слоистой среды:

$$T = \frac{4}{2 + (|M_{11}|)^2 \cdot \frac{n_m}{n_s} + (|M_{12}|)^2 \cdot n_m \cdot n_s + (|M_{21}|)^2 \cdot \frac{1}{n_m \cdot n_s} + (|M_{22}|)^2 \cdot \frac{n_s}{n_m}}, \quad (5)$$

$$R = 1 - T, \quad (6)$$

где n_m и n_s – показатели преломления света с λ_0 материалами, из которых изготовлены первая (из которой идет излучение) и вторая (в которую идет излучение) полубесконечные среды, ограничивающие слоистую структуру соответственно.

Для ускорения процесса расчета и выбора наиболее технологичных интерференционных покрытий с заданными коэффициентами отражения нами написано компьютерное приложение на языке программирования «С++» с использованием библиотеки классов «Qt» в бесплатной интегрированной среде разработки с открытым кодом «Qt Creator» с кроссплатформенным компилятором «MinGW». Показатели преломления света материалами, из которых изготавливаются оптические элементы ВКР-излучателя и ихние интерференционные покрытия, для интересующих нас длин волн излучения брались из [6]. В качестве материала активного элемента брался кристалл PbMoO_4 , пассивного лазерного затвора – кристалл $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG), остальных оптических элементов – радиационностойкое оптическое стекло K108, показатель преломления света которым близок к показателю преломления света оптическим стеклом K8, просветляющего покрытия активного элемента – тонкая пленка SiO_2 , просветляющего покрытия пассивного лазерного затвора – MgF_2 , зеркал и просветляющих покрытий стеклянных оптических элементов – чередующиеся слои тонких пленок SiO_2 и ZrO_2 . Рассчитанные коэффициенты отражения излучения с $\lambda = 1,351$ мкм и $\lambda = 1,531$ мкм на торцевых гранях оптических элементов лазерного излучателя представлены в таблице.

Элемент	Коэффициент отражения излучения на элементе, %	
	с $\lambda = 1,351$ мкм	с $\lambda = 1,531$ мкм
Выходное зеркало	99,81	54,19
Торцевые грани активного элемента	0,28	0,24
Торцевые грани призмы полного внутреннего отражения и двух юстировочных клиньев	0,31	0,33
Торцевые грани пассивного затвора	0,14	0,11
Глухое зеркало	99,76	99,76
Внешняя торцевая грань стеклянной пластинки, на внутреннюю торцевую грань которой нанесены зеркала	–	0,001

3. Методика расчета угловой расходимости нулевой поперечной моды и селекции основной поперечной моды

Угловая расходимость нулевой (основной) поперечной моды определяется в [7] выражением

$$\theta = \sqrt{\frac{\lambda_0}{L_n}}, \quad (7)$$

где λ_0 – длина волны излучения в вакууме; L_n – оптическая длина резонатора.

Для излучения с $\lambda = 1,351$ мкм для выбранного излучателя угловая расходимость нулевой поперечной моды равна $7'31''$, а для излучения с $\lambda = 1,531$ мкм – $8'$.

Для вычисления дифракционных потерь моды n -го порядка воспользуемся формулами из [8]:

$$\delta_n = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \beta \cdot (M + \beta) \cdot n^2}{((M + \beta)^2 + \beta^2)^2}, \quad (8)$$

$$M = \sqrt{8 \cdot \pi \cdot F}, \quad (9)$$

$$F = \frac{(\cos(\theta_1) \cdot a_1) \cdot (\cos(\theta_2) \cdot a_2)}{\lambda_0 \cdot L_n}, \quad (10)$$

где F – число Френеля; θ_1, θ_2 – углы наклона зеркал; $2 \cdot a_1, 2 \cdot a_2$ – апертуры зеркал; λ_0 – длина волны генерируемого излучения в вакууме; $\beta \approx 0,824$; $n = 1, 2, \dots$; L_n – оптическое расстояние между зеркалами.

Условием развития неустойчивости одномодовой генерации определим развитие генерации на соседней поперечной моде. Выражение для критического с точки зрения развития неустойчивости отношения коэффициента усиления слабого сигнала g_{0c} к порогу генерации $g_t^{(1)}$ по [9]:

$$G_{0c} = \frac{g_{0c}}{g_t^{(1)}} = \begin{cases} \frac{z}{(2-z)^2}, & z < 2, \\ \infty, & z \geq 2, \end{cases} \quad (11)$$

$$z = \frac{-\ln(r) + 2 \cdot \delta_1}{-\ln(r) + \frac{\delta_1}{2}}, \quad (12)$$

где r – коэффициент отражения зеркала связи (глухого зеркала).

Подберем такие равные апертуры зеркал, при которых будет устойчивая одномодовая генерация и малые дифракционные потери для основной моды. Для этого построим зависимости $G_{0c}(a)$ и $\delta_1(a)$ для излучения с $\lambda = 1,531$ мкм ($G_{0c}(a)$ и $\delta_1(a)$) и $\lambda = 1,351$ мкм ($G_{0c2}(a)$ и $\delta_2(a)$) (рис. 1 и 2).

Из рис. 1 видно, что при апертурах зеркал меньше 5,7 мм $G_{0c}(a) \rightarrow \infty$ и $G_{0c2}(a) \rightarrow \infty$, а, значит, будет устойчивая одномодовая генерация излучения на рабочей длине волны 1,531 мкм и эффективное ВКР-преобразование излучения на длине волны 1,351 мкм, так как последнее тоже генерируется в устойчивом одномодовом режиме.

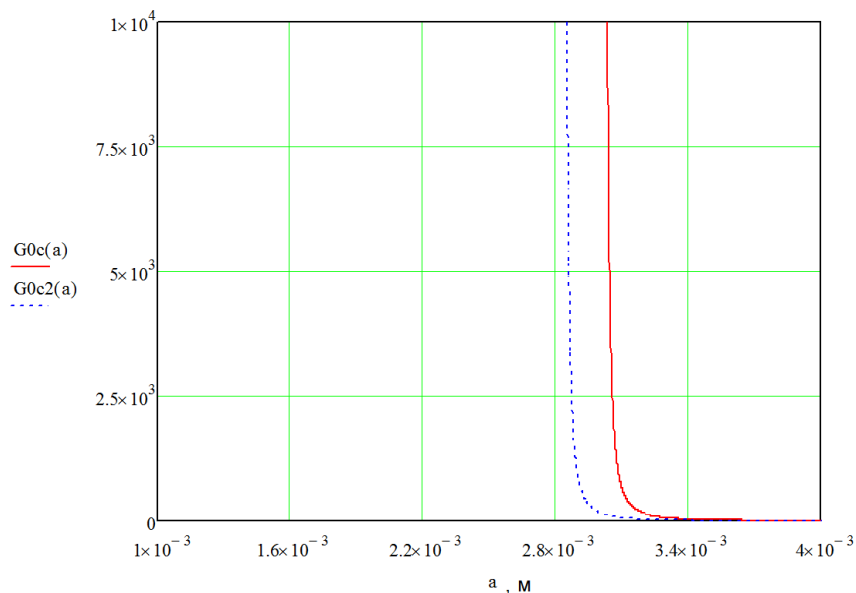


Рис. 1

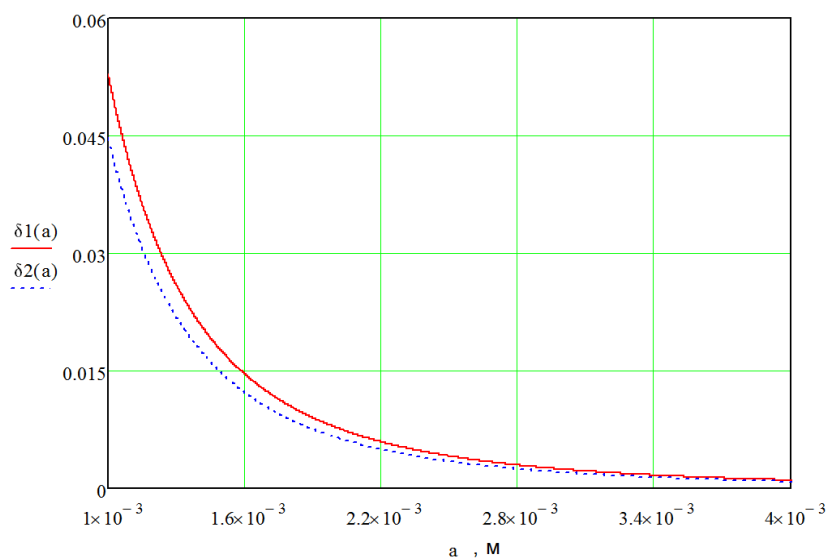


Рис. 2

4. Лазерный затвор

Нелинейный поглотитель YAG:V^{3+} перспективный для применения в ВКР-лазере, который генерирует относительно безопасное для зрения излучение, так как такой поглотитель является насыщающимся поглотителем для основного излучения и практически прозрачен в ненасыщенном состоянии для стоксовых компонент (рис. 3) [10]. Для длины волны излучения 1,34 мкм его показатель преломления $n = 1,82$, сечение поглощения из основного уровня $\sigma_{gsa} = 72 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, сечение поглощения из возбужденного уровня $\sigma_{esa} = 7,4 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$.

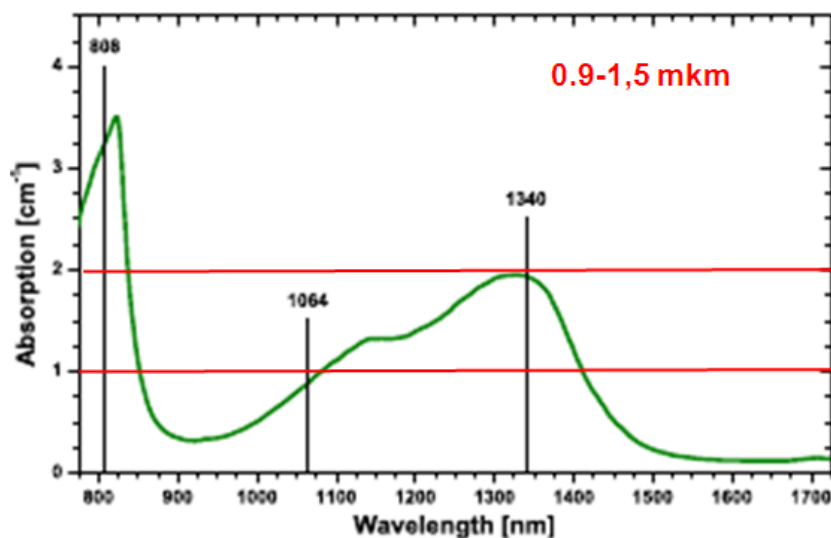


Рис. 3

В работе [11] отмечено, что характеристики лазера зависят от ориентации кристаллографических осей затвора $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$ по отношению к ориентации кристаллографических осей активного элемента. Пороговая энергия накачки лазера не зависит от кристаллографической ориентации затвора. Энергия генерации лазера изменяется в зависимости от угла поворота такого затвора вокруг оптической оси и максимальна при кристалле $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$, выращенном в направлении [100] и вырезанном так, чтобы оптическая ось затвора была перпендикулярна кристаллографической плоскости (100).

Из [12] нормализованная начальная плотность инверсной населенности зависит от параметров пассивного лазерного затвора и резонатора:

$$N = \frac{1 + \frac{\ln(\frac{1}{T_0^2})}{R} + L}{1 + \frac{\sigma_{esa}}{\sigma_{gsa}} \cdot \frac{\ln(\frac{1}{T_0^2})}{\ln(\frac{1}{R}) + L}}, \quad (13)$$

где T_0 – начальное пропускание пассивного лазерного затвора для основного излучения; R – коэффициент отражения выходного зеркала для основного излучения; L – односторонние диссипативные оптические потери основного излучения в резонаторе; σ_{esa} – сечение поглощения возбужденного состояния пассивного лазерного затвора; σ_{gsa} – сечение поглощения основного состояния пассивного лазерного затвора.

Построим зависимость $N(T_0)$ для выбранного лазерного излучателя (рис. 4).

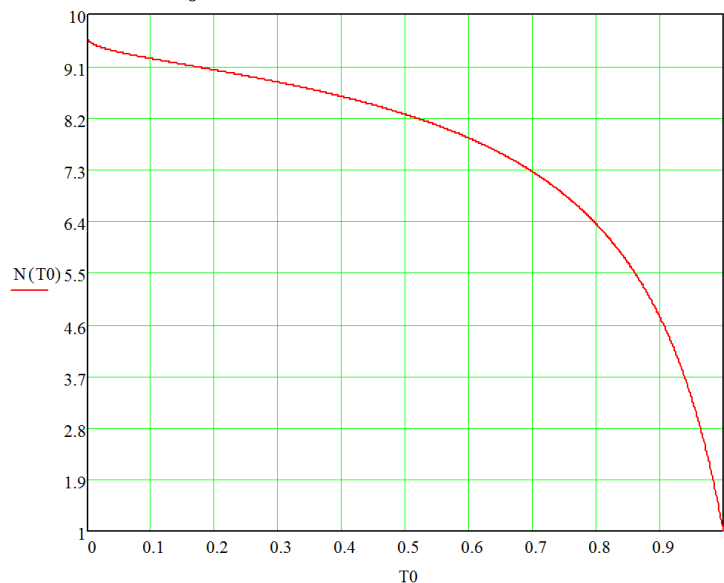


Рис. 4

Нами предложено использовать лазерный пассивный затвор с $T_0 = 50\%$, поскольку он обеспечивает высокую нормализованную начальную плотность инверсной населенности при умеренной мощности накачки активного элемента.

5. Система накачки активного элемента и концентрация его активаторов

Один из максимумов поглощения излучения ионами Nd^{3+} в лазерных кристаллах (рис. 5) [13] совпадает с длиной волны излучения промышленных мощных линеек лазерных диодов 808 нм.

При выбранной поперечной накачке активного элемента излучением линеек лазерных диодов предложено использовать диффузные отражатели для повышения эффективности и однородности накачки [14] и, следовательно, повышения выходной энергии импульсов излучения разрабатываемого лазерного излучателя и снижения тепловых эффектов в активном элементе.

Изначально предложено использовать активный элемент в виде стержня длиной 50 мм и диаметром 4 мм из кристалла $\text{PbMoO}_4:\text{Nd}^{3+}$ с максимально достижимой концентрацией ионов неодима (с массовой долей Nd^{3+} 3 %) [15] для достижения максимальной плотности мощности возбуждающего излучения с $\lambda = 1,351$ мкм, чтобы превысить порог ВКР. В процессе изготовления такого ВКР-излучателя, вероятно, потребуется оптимизация кон-

центрации активатора и толщины выбранного активного элемента, так как при слишком больших значениях этих величин активный элемент может не прокачаться полностью выбранной системой накачки и, следовательно, будет слишком неоднородная накачка и малая выходная энергия импульсов излучения разрабатываемого лазерного излучателя.

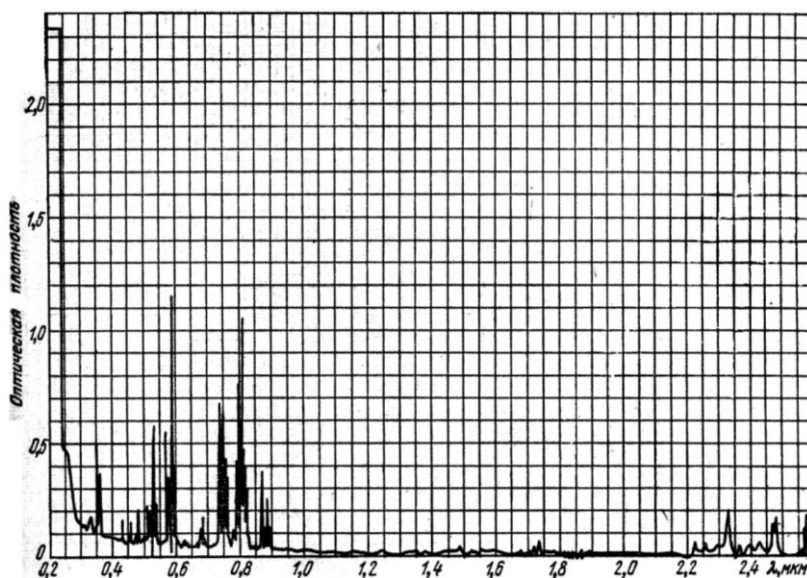


Рис. 5

Пороговая мощность накачки основного излучения определяется выражением из [16]:

$$P_{\text{порог}} = \eta \cdot (\omega_p^2 + \omega_L^2) \cdot \frac{\ln\left(\frac{1}{R}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_0}\right) + L + 2 \cdot \sigma \cdot n_{a0} \cdot l}{2 \cdot \sigma \cdot l}, \quad (14)$$

где η – параметр, относящийся к эффективности накачки, который определяется экспериментально; ω_p – средний радиус луча накачки в усиливающей среде; ω_L – радиус лазерной моды основного излучения; R – коэффициент отражения выходного зеркала для основного излучения; T_0 – начальное пропускание пассивного лазерного затвора для основного излучения; L – однопроходные диссипативные оптические потери основного излучения в резонаторе; σ – сечение вынужденного излучения усиливающей среды; n_{a0} – начальная плотность населенности на нижнем лазерном уровне; l – геометрическая длина усиливающей среды.

Для нашего случая поперечной накачки ω_p и ω_L равны радиусу активного элемента. Поскольку в выражении (14) есть несколько величин, которые определяются экспериментально для конкретного изготовленного лазера, оценить пороговую мощность накачки основного излучения удалось приблизительно: предположено, что она будет менее 400 Вт.

Пороговая мощность накачки и соответствующая ей энергия импульса излучения лазерного излучателя должны повышаться при повышении массовой доли Nd^{3+} в активном элементе и уменьшении начального пропускания пассивного лазерного затвора для основного излучения [17].

Существуют диапазоны мощностей и длительностей накачки, в которых обеспечивается моноимпульсный режим работы лазерного излучателя [5, 17]. Для обеспечения моноимпульсного режима работы лазерного излучателя при значительном повышении мощности накачки необходимо уменьшать ее длительность, и наоборот.

В результате проведенных исследований [17] было показано, что минимальная пороговая мощность накачки обеспечивается при положении плоскости поляризации активного элемента по отношению к оси вращения в 13° при условии, что отсчет начинается от плоскости, проходящей через ось вращения активного элемента и ось излучения линеек лазерных диодов накачки. При изменении расположения плоскости поляризации активного элемента по отношению к оси вращения в диапазоне от 8° до 18° пороговая мощность накачки изменяется незначительно.

Установлено, что при нарушении соосности активного элемента и резонатора, диапазон мощностей накачки, при которых обеспечивается моноимпульсный режим работы лазера, уменьшается вплоть до полного исчезновения при значительном нарушении соосности. Поэтому при сборке лазера необходимо контролировать положение активного элемента по отношению к оси резонатора.

6. Предлагаемая конструкция и оптическая схема лазерного ВКР-излучателя

В конструкции лазера предусмотрено, что юстировка резонатора осуществляется с помощью юстировочных клиньев, которые корректируют направление распространения излучения в резонаторе. Поэтому, существует диапазон положений юстировочных клиньев, при которых в резонаторе устанавливаются минимальные потери, в результате чего обеспечивается необходимая энергия в импульсе лазерного излучения и при этом не превышает максимально допустимая пороговая мощность накачки. В процессе экспериментов [17] положение клиньев фиксировалось приблизительно посередине диапазона, в пределах которого обеспечивалась генерация, что обеспечивало стабильную работу лазеров при изменении температуры окружающей среды.

На рис. 6 представлена предлагаемая конструкция, а на рис. 7 – оптическая схема выбранного лазерного ВКР-излучателя: 1 – линейки лазерных диодов накачки мощностью 100 Вт каждая и с длиной волны излучения 808 нм; 2 – активный элемент с просветляющими покрытиями 3 на торцах во втулках; 4 – выходное зеркало, нанесенное на стеклянную пластинку 11; 6 – призма полного внутреннего отражения с просветляющими покрытиями 5 на пути следования лазерного излучения; 7 – юстировочные клинья с просветляющими покрытиями 5 на торцах во втулках; 9 – лазерный пассивный затвор с просветляющими покрытиями 8 на торцах во втулке; 10 – глухое зеркало, нанесенное на стеклянную пластинку 11; 12 – просветляющее покрытие; 13 – втулки, в которых можно вращать клинья и затвор, которые фиксируются фиксаторами 14; 15 – диффузные отражатели из молочного стекла.

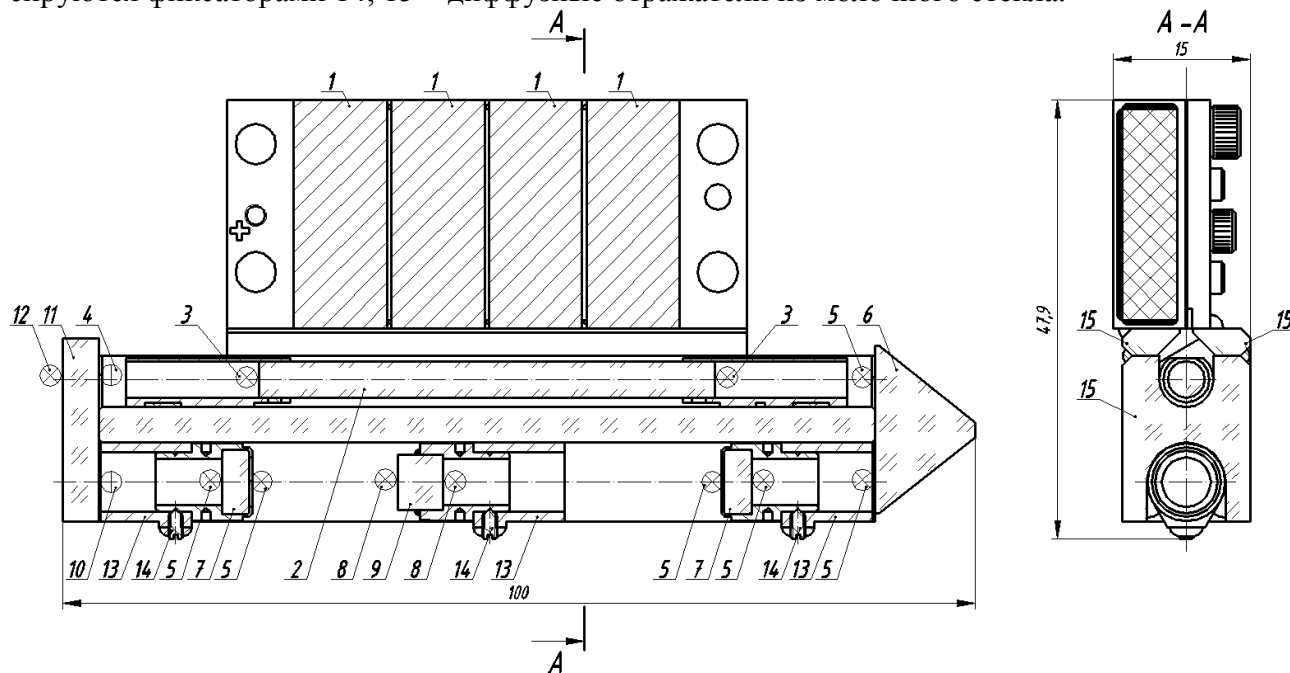


Рис. 6

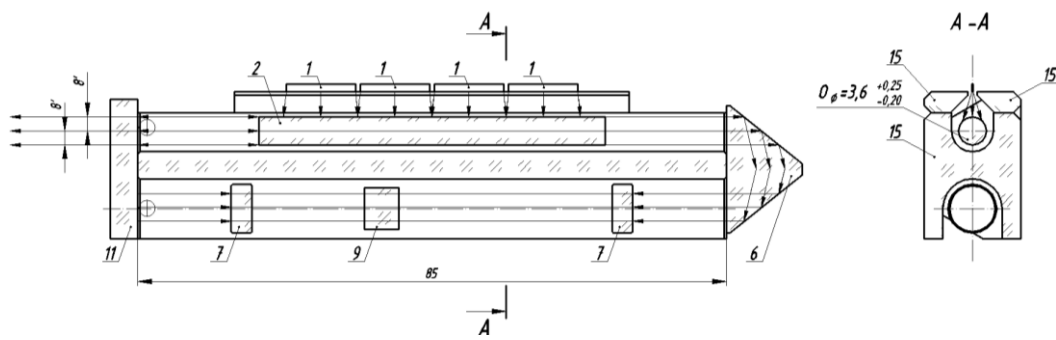


Рис. 7

Втулки предложено изготавливать из титана, поскольку его коэффициент теплового расширения близок к коэффициентам теплового расширения материалов, из которых изготавливаются смежные оптические детали.

Заключение

Смоделирован компактный, мощный, высокоэффективный лазерный излучатель, работающий на длине волны излучения 1,531 мкм в моноимпульсном или квазинепрерывном режиме. Разработана методика расчета параметров ВКР-лазеров. Для ускорения процесса расчета и выбора наиболее технологичных интерференционных покрытий с заданными коэффициентами отражения написано компьютерное приложение. Составлен комплект конструкторской и технологической документации для изготовления смоделированного лазерного ВКР-излучателя.

Список литературы: 1. *Сверчков, С.Е.* 1,5 мкм иттербий-эрбиевые лазеры с диодной накачкой – элементная база и генерационные возможности : дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.21 / Сергей Евгеньевич Сверчков. – Москва, 2005. – 238 с. 2. *Безносенко, И.В.* Вынужденное комбинационное рассеяние в приложении источников полумикронного излучения / И.В. Безносенко, Ю.П. Мачехин // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Т. 13, № 4. – С. 406 – 419. 3. *Комбинационное* рассеяние света [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%CA%EE%EC%E1_%E8%ED%E0%F6%E8%EE%ED%ED%EE%E5_%F0%E0%F1%F1%E5%FF%ED%E8%E5_%F1%E2%E5%F2%E0. – Загл. с экрана. 4. *Зверев, П.Г.* ВКР активные кристаллы и разработка ВКР преобразователей на их основе : дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.21 / Петр Георгиевич Зверев. – Москва, 2012. – 328 с. 5. *Yashkir, Yuri M.* Numerical modeling of the intra-cavity stimulated Raman scattering as a source of sub-nanosecond optical pulses. / Yuri M. Yashkir, Yuriy Yu. Yashkir // University of Toronto Optical Technologies Centre. – 9 p. 6. *Refractive index database* [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://refractiveindex.info> – Загл. с экрана. 7. *Байбородин, Ю.В.* Основы лазерной техники / Ю.В. Байбородин. – М. : Высш. шк., 1988. – 383 с. 8. *Вайнштейн, Л.А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы / Л.А. Вайнштейн. – М. : Сов. радио, 1966. – 476 с. 9. *Елкин, Н.Н.* Об устойчивой односторонней генерации в плоскопараллельном резонаторе с активной средой / Н.Н. Елкин, А.П. Напартович // Квантовая электроника. – 1994. – № 1. – С. 32 – 36. 10. *Сироткин, А.А.* Управление спектральными и временными параметрами лазеров на кристаллах ванадатов : дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.21 / Анатолий Андреевич Сироткин. – Москва, 2014. – 282 с. 11. *Механизм* просветления пассивных затворов YAG:V³⁺ при ВКР преобразовании в кристаллах KGW:Nd³⁺ / А.Н. Титов, В.Н. Иванов, В.Н. Ветров и др. // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 1. – С. 49 – 52. 12. *Numerical modelling of passively Q-switched intracavity Raman lasers* / Shuanghong Ding, Xingyu Zhang, Qingpu Wang et al. // Appl. Phys. 2007. Vol. 40. P. 2736 – 2747. 13. *Лазер* на кристалле алюмоиттриевого граната с неодимом (YAG:Nd³⁺) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://prac-gw.sinp.msu.ru/images/atom/descriptions%20atom/atom18.pdf> – Загл. с экрана. 14. *Гречин, С.Г.* Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой / С.Г. Гречин, П.П. Николаев // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39, № 1. – С. 1 – 17. 15. *Development of Growth Technologies for the Photonic Single Crystals by the Czochralski Method at Institute for Single Crystals, NAS of Ukraine* / М.В. Kosmyna, В.Р. Nazarenko, V.М. Puzikov and A.N. Shekhovtsov // ACTA PHYSICA POLONICA A. – 2013. – Vol. 124, No. 2. – P. 305 – 313. 16. *Passive Q-switching characteristics of Yb³⁺:Gd₃Ga₅O₁₂ crystal* / Xingyu Zhang, Alain Brenier, Qingpu Wang et al. // OPTICS EXPRESS. – 2005. – Vol. 13, No. – 19. P. 7708 – 7719. 17. *Безносенко, И.В.* Исследование условий стабильной моноимпульсной генерации лазера на кристалле KGW:Nd³⁺ / И.В. Безносенко, Ю.П. Мачехин // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Т. 13, № 2. – С. 169 – 172.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.07.2015