

УДК 535.31+535.417.2+621.373.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ «RESONATOR STUDIO» И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

А. П. Зиновьев^{1,3}, М. В. Кольцов², О. В. Мартынова¹

¹ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского;

² Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева;

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Разработан и апробирован свободно распространяемый программный пакет «Resonator Studio», позволяющий моделировать сложные оптические системы методом матричной оптики применительно к гауссову пучку. Результаты моделирования многокомпонентных оптических систем были сопоставлены с данными экспериментов. Показано, что варьирование местоположения оптических элементов без изменения общей длины системы и построение областей устойчивости в зависимости от двух параметров позволяет ускорить создание лабораторного макета.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при построении оптических систем, содержащих большое количество элементов, для достижения требуемых параметров излучения требуется провести экспериментальное упрощение архитектуры системы с последующим её усложнением. Другим способом может служить предварительное моделирование с расчётом местоположения и характеристик её оптических элементов. Экспериментальное построение системы в большинстве случаев ограничивается сравнительно небольшим количеством элементов (5–10) и простыми оценками на основе опыта или геометрической оптики. Однако расчёты таким методом становятся слишком сложными при большем количестве элементов системы. К таким же проблемам приводит наличие нелинейных и/или неоднородных компонентов. В этом случае без предварительного моделирования и численных оценок затруднительно рассчитать систему за приемлемое время.

Существует несколько способов теоретического описания оптических систем. Важнейшими из них являются описание мод резонаторов и лазерного излучения с помощью гауссова пучка, метод интегрального уравнения, приближение геометрической оптики и метод разделения переменных [1–5]. При этом наиболее универсальным является метод интегрального уравнения, поскольку полученная с его помощью информация, как правило, не может быть получена другими способами. Однако при расчёте сложных систем этот метод требует серьёзных вычислительных ресурсов даже при современном уровне развития техники. Для быстрых численных оценок наибольшее распространение получили методы, основанные на приближении геометрической оптики. В частности, в этой области исследований широко применяется метод матричной оптики.

В настоящее время имеется достаточно большое количество проектов, посвящённых моделированию оптических систем и характеристик выходного излучения. Среди них есть как свободно распространяемые программы, так и коммерческая продукция. Коммерческие программные пакеты, например «LAS-CAD» [6], «Virtual Lab 4 Laser Resonator Toolbox» [7], «WaveTrain» [8], являются достаточно развитыми и в некоторой степени универсальными. Тем не менее, высокая стоимость и сложности освоения создают препятствия для их применения в научно-исследовательской деятельности. В свою очередь, большинство свободно распространяемых программных комплексов либо очень узко специализированы («LineRes», «SintRes» [9]), либо имеют ряд ограничений («reZonator» [10]).

Таким образом, можно определить некоторый набор требований к программному инструментарию: минимизация требуемых вычислительных ресурсов; моделирование параметров системы за приемлемое время (например, не более рабочего дня); простота и наглядность построения эскиза оптической системы; расширенный набор оптических элементов, который включает в себя элементы с квадратичной зависимостью показателя преломления от поперечной координаты и линейной зависимостью от продольной; возможность определения диаметра пучка и кривизны волнового фронта в произвольном сечении; возможность одновременного варьирования одного или двух параметров элементов и графического представления результата; возможность варьирования местоположения оптических элементов с сохранением общей длины системы.

В данной работе коллектив авторов представляет свободно распространяемый программный пакет «Resonator Studio» [11], который удовлетворяет перечисленным выше требованиям; также приведено сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными.

1. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА «RESONATOR STUDIO»

Программный комплекс «Resonator Studio» [11] позволяет быстро создавать эскиз произвольной оптической системы из набора стандартных элементов (слоёв сред, линз, зеркал и т.п.), а затем рассчитывать его устойчивость и параметры светового пучка внутри него методом матричной оптики.

В «Resonator Studio» возможно использование следующих оптических элементов [5]: 1) слоя свободного пространства или однородной среды; 2) линзы собирающей и рассеивающей; 3) плоского зеркала; 4) сферического зеркала; 5) сферической границы между средами с разными показателями преломления; 6) слоя среды с неоднородным показателем преломления (с квадратичной зависимостью от поперечной координаты и линейной от продольной); 7) пользовательского элемента с произвольной матрицей.

Пакет «Resonator Studio» позволяет выполнять следующие задачи:

- 1) расчёт диаметра пучка и кривизны волнового фронта вдоль оси резонатора при фиксированных параметрах;
- 2) расчёт диаграммы устойчивости, диаметра пучка и кривизны волнового фронта в опорной плоскости при варьировании одного из параметров какого-либо элемента системы, включая его положение в схеме;
- 3) расчёт двумерной диаграммы устойчивости, диаметра пучка и кривизны волнового фронта в опорной плоскости при варьировании двух параметров системы.

2. СЛОЙ СРЕДЫ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Программный пакет «Resonator Studio» позволяет оценивать влияние на параметры системы слоя среды с неоднородным показателем преломления.

Данный элемент может быть полезен при моделировании кристаллов, находящихся под действием интенсивной накачки, включая торцевую. Программа позволяет использовать два вида неоднородности: квадратичное распределение показателя преломления по поперечной координате r , а также линейное изменение коэффициента неоднородности g и показателя преломления в центре кристалла n_0 вдоль продольной координаты z :

$$n(r, z) = n_0(z) [1 + g(z)r^2], \quad (1)$$

где

$$n_0(z) = n_1 + (z - z_0)(n_r - n_1)/L, \quad g(z) = g_1 + (z - z_0)(g_r - g_1)/L,$$

z_0 — координата начала (левого торца) элемента, n_l и g_l — показатель преломления в точке пересечения оптической оси с левым торцом и коэффициент квадратичной неоднородности на левом торце соответственно, n_r и g_r — то же самое на правом торце, L — протяжённость слоя неоднородной среды.

При расчёте среда разбивается на множество из N слоёв равной толщины, в каждом из которых n_0 и g считаются постоянными. Матрица каждого слоя с толщиной $\Delta L = L/N$ имеет вид

$$\Delta \mathbf{M}(i) = \begin{pmatrix} \operatorname{ch}[\sqrt{2g(z)} \Delta L] & \frac{\operatorname{sh}[\sqrt{2g(z)} \Delta L]}{n_0(z) \sqrt{2g(z)}} \\ -\sqrt{2g(z)} n_0(z) \operatorname{sh}[\sqrt{2g(z)} \Delta L] & \operatorname{ch}[\sqrt{2g(z)} \Delta L] \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $g > 0$, $z = z_0 + i \Delta L$, $i = 0, \dots, N$. Выражение (2) справедливо и при $g < 0$, но в этом случае гиперболические функции преобразуются в тригонометрические. Итоговая матрица элемента выражается произведением

$$\mathbf{M} = \prod_{i=0}^N \Delta \mathbf{M}(i). \quad (3)$$

При $n_l = n_r$ и $g_l = g_r$ деления на слои не происходит, поэтому вычисления в этом случае занимают существенно меньше времени, чем в отсутствие равенства этих параметров.

Для моделирования термооптических и нелинейных оптических эффектов, возникающих в активной среде под действием накачки [12–15], элементом может служить слой среды с неоднородным показателем преломления, ограниченный двумя сферическими поверхностями, описывающими деформацию торцов.

Безусловно, линейное распределение показателя преломления вдоль оптической оси не даёт точных результатов при расчёте изменений в кристалле под действием накачки, но позволяет сделать приближённые оценки. Для увеличения точности расчёта нелинейный слой среды может быть составлен из нескольких элементов.

Примеры классических случаев (резонатор со сферическими зеркалами, плоский резонатор с линзой) можно найти в каталоге программы в директории SAMPLES.

3. ПРИМЕР РАСЧЁТА РЕЗОНАТОРА В «RESONATOR STUDIO»

Рассмотрим пример расчёта резонатора, в котором присутствует элемент с неоднородным показателем преломления (см. рис. 1). Визуальная модель оптической системы в «Resonator Studio» представлена на рис. 1а.

Если бы слой среды между двумя плоскими зеркалами, обладал однородным показателем преломления, то такой резонатор находился бы на границе зоны устойчивости (плоский резонатор), а диаметр пучка в нём стремился бы к бесконечности. Но в данном случае показатель преломления неоднороден (с правого торца квадратичный коэффициент $g_r = -0,05 \text{ мм}^{-2}$, с левого торца $g_l = -0,01 \text{ мм}^{-2}$), что указывает на линзовые свойства такой среды и превращает резонатор в устойчивый.

Распределение диаметра пучка внутри такого элемента имеет вид квазипериодической функции (см. рис. 1б). Размах колебаний справа выше, чем слева, вследствие более сильной неоднородности с правого торца.

При $g_l = g_r$ колебания радиуса пучка представляют периодическую функцию (рис. 1в, колебания происходят вблизи значения $r_b = 2,75 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$), что полностью подтверждается литера-

Рис. 1. Схема резонатора с плоскими зеркалами и слоем среды с неоднородным показателем преломления в «Resonator Studio» (а), опорные плоскости обозначены цифрой 1, слой среды — цифрой 2. Колебания радиуса пучка r_b внутри элемента при $g_r = -0,05 \text{ мм}^{-2}$, $g_l = -0,01 \text{ мм}^{-2}$ (б) и при $g_l = g_r = -0,1 < 0$ (в)

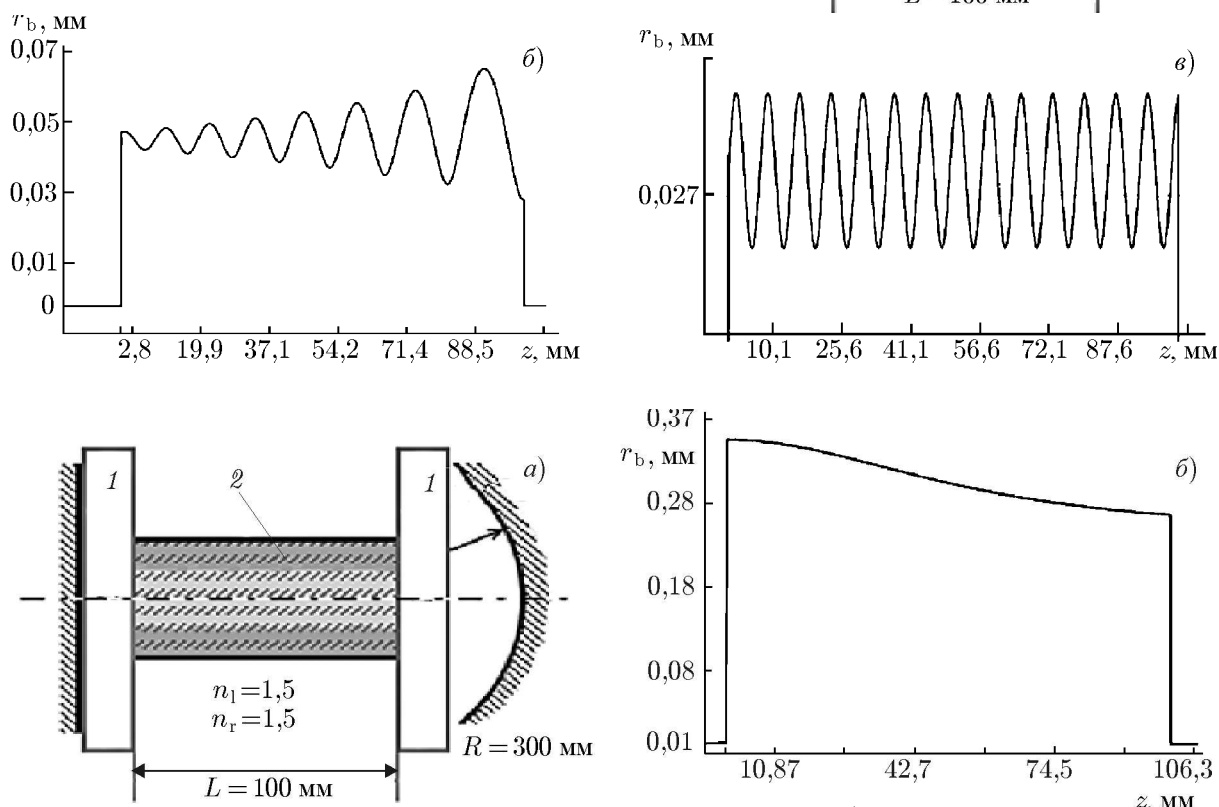


Рис. 2. Схема резонатора со слоем неоднородной среды с $g_r = g_l = 10^{-4} > 0$ в «Resonator Studio» (а), опорные плоскости обозначены цифрой 1, слой среды — цифрой 2. Изменение радиуса пучка вдоль резонатора (б)

турой [5]. При этом амплитуда колебаний на семь порядков меньше радиуса пучка.¹

Выше предполагалось, что коэффициенты $g_l < 0$ и $g_r < 0$; при положительных коэффициентах функция, описывающая радиус пучка, имеет экспоненциальный характер (4), а эквивалентная линза является рассеивающей, и для устойчивости резонатора требуется компенсация дефокусировки. Этого можно достичь, например, заменив одно из плоских зеркал на сферическое (рис. 2).

¹ Для того, чтобы точно определить амплитуду колебаний, необходимо в настройках программы увеличить число значащих цифр после запятой: в меню «Файл» необходимо выбрать вкладку «Свойства проекта», после чего параметру «Точность округления» нужно присвоить значение 10. Далее, используя курсор, можно определить значение минимального и максимального отклонения.

4. СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для оценки достоверности моделирования были сопоставлены экспериментальные данные с результатами «Resonator Studio».

В качестве экспериментальной оптической системы был выбран лазерный генератор на кристалле Nd:YLF с продольной диодной накачкой на длине волны $\lambda_{\text{pump}} = 806$ нм, с длиной волны генерации $\lambda_{\text{gen}} = 1053$ нм и общей длиной резонатора 1,5 м.

В экспериментальной установке в качестве активного элемента лазера применялся кристалл Nd:YLiF₄ с концентрацией ионов Nd³⁺ 1 % по числу частиц. Образец был вырезан в форме стержня с диаметром 3 мм, длиной 13,2 мм и с оптической осью, ориентированной вдоль радиуса. Ориентация оптической оси кристалла в схеме была горизонтальной. Активная среда

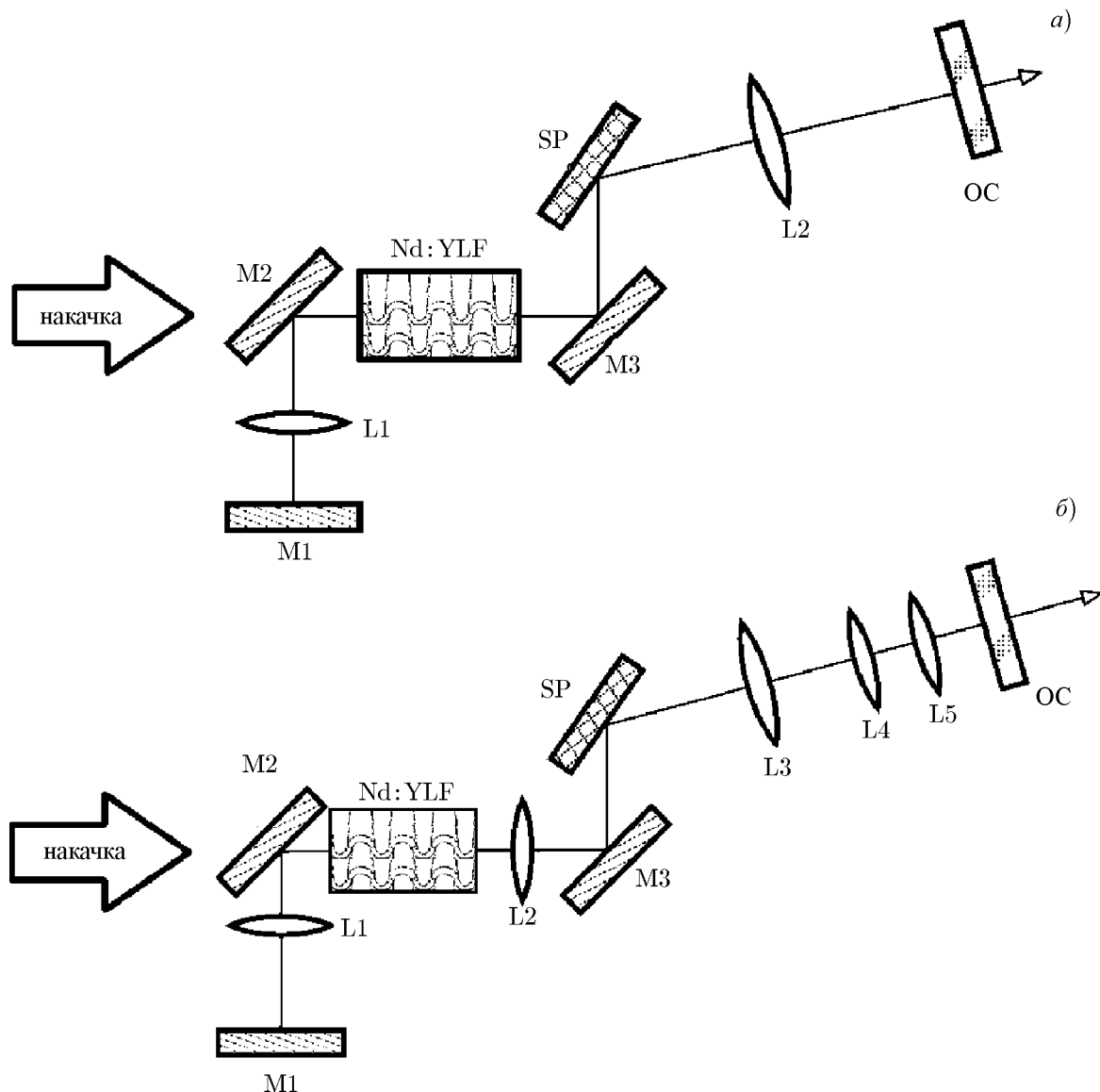


Рис. 3. Экспериментальные схемы «резонатор 1» (а) и «резонатор 2» (б). Здесь и далее М1–М3 — зеркала, SP — поляризационное зеркало, L1–L5 — линзы, OC — выходное зеркало

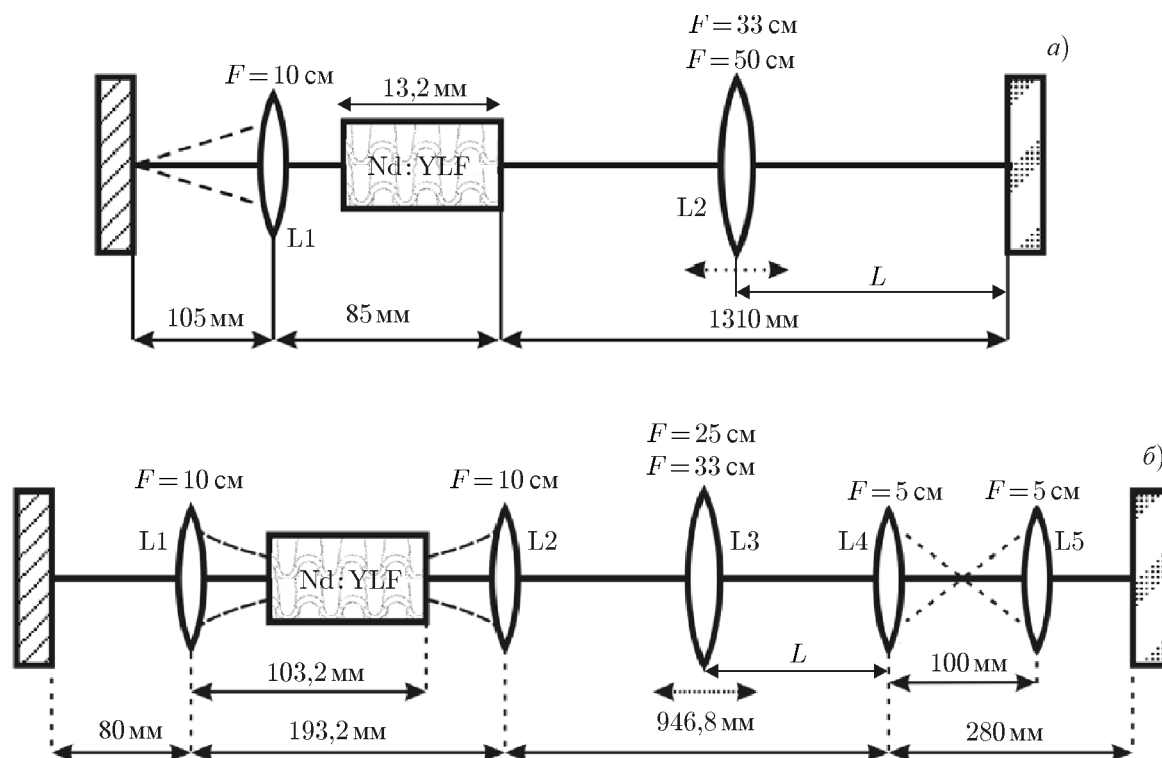


Рис. 4. Эквивалентные схемы конфигураций «резонатор 1» (а) и «резонатор 2» (б)

возбуждалась линейкой лазерных диодов FAP-810 фирмы «Coherent» с волоконным выходом на длине волны 806 нм. Данная длина волны накачки для Nd:YLF не является оптимальной, что приводит к снижению тепловой нагрузки из-за равномерного поглощения излучения π - и σ -поляризаций [16]. Однако пороговая мощность накачки при этом повышается и требования к устойчивости оптической системы увеличиваются. Накачка осуществлялась с торца кристалла. Для получения генерации на длине волны 1053 нм использовалось поляризационное зеркало (SP). Экспериментальные схемы генератора представлены на рис. 3. Обозначим условно схему на рис. 3а «резонатор 1», а на рис. 3б — «резонатор 2».

Первым этапом создания систем стало их моделирование в «Resonator Studio». На рис. 4 представлены схемы генераторов, эквивалентные приведённым на рис. 3. Кристалл моделировался слоем неоднородной среды, ограниченный двумя сферическими поверхностями, описывающими тепловую деформацию. Параметры моделирования активного элемента при интенсивной накачке были определены по методике [12–15].

В варианте конфигурации «резонатор 1» внутри резонатора помещались две линзы. Положение первой линзы (L1) вблизи кристалла было фиксированным; её фокусное расстояние $F = 10$ см. При помощи «Resonator Studio» для различных фокусных расстояний второй линзы (L2) были рассчитаны области её расположения на оптической оси системы, при которых резонатор устойчив (положение линзы определялось расстоянием L от линзы L2 до выходного зеркала, см. рис. 4а). Для эксперимента были выбраны линзы L2 с фокусными расстояниями $F = 33$ см и 50 см; данный выбор обусловлен их наличием и достаточно широкими диапазонами возможных местоположений.

На рис. 5 показаны зависимости радиуса пучка на опорной плоскости от положения линзы L2 (расстояния L). На рис. 5а можно видеть рассчитанную область устойчивости резонатора отно-

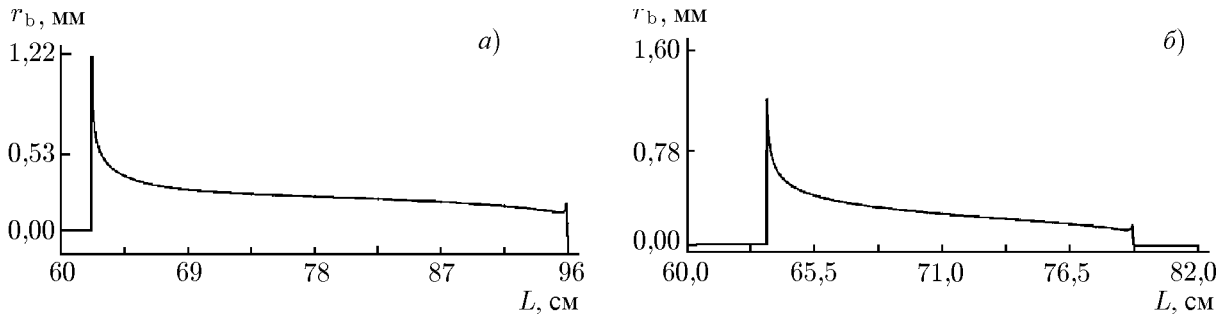


Рис. 5. Зависимость радиуса пучка на опорной плоскости от положения линзы L2 с фокусным расстоянием 33 см (а) и 50 см (б) для схемы «резонатор 1»

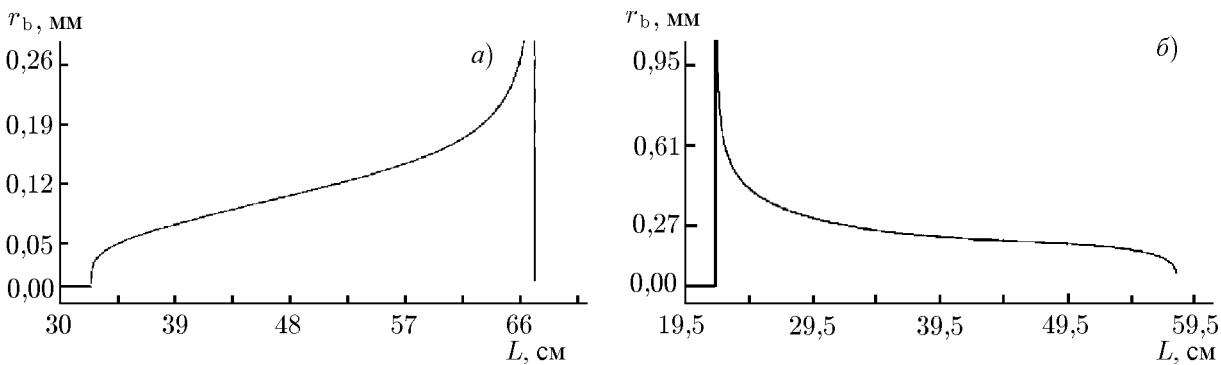


Рис. 6. Зависимость радиуса пучка на опорной плоскости от положения линзы L3 с фокусным расстоянием 33 см (а) и 25 см (б) для схемы «резонатор 2»

сительно положения коллимирующей линзы L2 с $F = 33$ см; эта область соответствует диапазону $L = 62 \div 96$ см. Аналогичный расчёт зон устойчивости для линзы с $F = 50$ см показан на рис. 5б; в этом случае диапазон расстояний составил $L = 63 \div 78$ см. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными представлено в табл. 1.

В варианте конфигурации «резонатор 2» были получены области расположения линзы L3, в которых резонатор устойчив. Зависимость радиуса пучка на опорной плоскости от положения линзы L3 представлена на рис. 6 для линз с фокусным расстоянием 33 см (рис. 6а) и 25 см (рис. 6б). Здесь расположение линзы определено расстоянием между линзами L3 и L4, поскольку положение линзы L3 варьировалось между линзой L4 и зеркалом SP (см. рис. 3б, 4б). Для линзы с фокусным расстоянием $F = 33$ см область устойчивости находилась в диапазоне $L = 60 \div 95$ см. Как и следовало ожидать, внесение в резонатор однократной оптической телескопической системы существенно не влияет на положение зоны устойчивости. Для линзы L3 с фокусным расстоянием $F = 25$ см область устойчивости по результатам расчётов находилась в диапазоне $L = 50 \div 85$ см. При анализе этих графиков следует принять во внимание, что по

Таблица 1

Схема	F , см	Область устойчивости по L (расчёт), см	Область устойчивости по L (эксперимент), см
«резонатор 1»	50	63 ÷ 78 (см. рис. 5б)	67 ÷ 82
«резонатор 1»	33	62 ÷ 96 (см. рис. 5а)	63 ÷ 93
«резонатор 2»	33	60 ÷ 95 (см. рис. 6а)	61 ÷ 95
«резонатор 2»	25	50 ÷ 85 (см. рис. 6б)	72 ÷ 87

горизонталь отложено расстояние от точки, смещённой на 28 см от края выходного зеркала (см. рис. 4б).

При проведении экспериментов зоны устойчивости в обоих вариантах конфигураций определялись по порогу генерации путём варьирования местоположения линз L2 и L3 для схем «резонатор 1» и «резонатор 2» соответственно. Если при каком-то положении линзы отсутствовала генерация во всём диапазоне мощности накачки, то такая система считалась неустойчивой.

Таким образом, экспериментально установлено, что для схемы «резонатор 1» при фокусном расстоянии линзы $F = 50$ см система устойчива при расстояниях $L = 67 \div 82$ см, а при $F = 33$ см — в диапазоне $L = 63 \div 93$ см. Для схемы «резонатор 2» генерация наблюдалась при расположении линзы с $F = 33$ см на расстояниях $L = 61 \div 95$ см, а для линзы с $F = 25$ см — при $L = 72 \div 87$ см.

Экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчётами. Тем не менее, для конфигурации «резонатор 2» и линзы L3 с фокусным расстоянием $F = 25$ см наблюдается сужение области местоположений линзы, обеспечивающей устойчивость системы. Данное рассогласование вполне ожидаемо, потому что области устойчивости, рассчитанные в «Resonator Studio» для таких параметров схемы, были не очень велики и в значительной степени зависели от отклонений в параметрах кристалла под действием интенсивной накачки. В модели, заложенной в программу, эти отклонения не учитывались.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана специализированная программа «Resonator Studio», позволяющая быстро создавать эквивалентный эскиз произвольной оптической системы из набора стандартных элементов (слоёв сред, линз, зеркал и т. п.), а затем рассчитывать методом матричной оптики применительно к гауссову пучку устойчивость и параметры светового пучка внутри неё. Программа позволяет строить одномерные и двумерные области устойчивости резонатора на плоскости параметров оптической системы (варьироваться могут любые параметры в заданных пользователем пределах). Программа выгодно отличается от своих аналогов наличием элементов, моделирующих тепловую деформацию лазерного кристалла и изменение его показателя преломления под действием интенсивной накачки. Кроме того, в «Resonator Studio» присутствует возможность варьировать положение элемента внутри схемы, сохраняя суммарную длину схемы.

Программный пакет был успешно протестирован на модельных задачах. Результаты моделирования полностью совпадают с известными аналитическими решениями.

Выполнена экспериментальная проверка результатов моделирования. Выявлена хорошая корреляция теоретических и экспериментальных результатов, за исключением особых случаев, когда было существенно влияние факторов, не описываемых в рамках используемой модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнштейн Л. А. Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Сов. радио, 1966.
2. Ищенко Е. Ф. Открытые оптические резонаторы: некоторые вопросы теории и расчёта. М.: Сов. радио, 1980.
3. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990.
4. Быков В. П., Силичев О. О. Лазерные резонаторы. М.: Физматлит, 2004.
5. Джеррард А., Берч Дж. М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978.
6. Altmann K., Pflaum C., Yahel R. LAS-CAD (LASer Cavity Analysis and Design): <http://www.las-cad.com>.

7. Virtual Lab 4 Laser Resonator Toolbox. LightTrans GmbH:
http://www.lighttrans.com/laser_resonator_tool.html.
8. WaveTrain. MZA Associates Corporation: <http://mza.com/Default.aspx#productstab-wt>.
9. Садовой А. LineRes и SintRes: <http://sadvovaya.narod.ru>.
10. Чуносков Н. И. reZonator: <http://www.the-rezonator.narod.ru/rus>.
11. Кольцов М. В. Resonator Studio: <http://tirinox.ru/resonator-studio>.
12. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твёрдых тел. М.: Наука, 1964.
13. Powel R. C. Physics of solid-state laser materials. New York: Springer-Verlag, 1998.
14. Антипов О. Л., Кужелев А. С., Лукьянов А. Ю., Зиновьев А. П. // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. С. 891.
15. Антипов О. Л., Анашкина Е. А., Фёдорова К. А. // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. С. 1131.
16. Li D., Ma Z., Haas R., et al. // Opt. Lett. 2008. V. 33, No. 15. P. 1708.

Поступила в редакцию 15 января 2013 г.; принята в печать 30 января 2013 г.

SIMULATION OF OPTICAL SYSTEMS IN THE “RESONATOR STUDIO” SOFTWARE PACKAGE AND THEIR EXPERIMENTAL REALIZATION

A. P. Zinov'ev, M. V. Kol'tsov, and O. V. Martynova

We developed and tested the free-distribution software package “Resonator Studio” which allows us to simulate complex optical systems using the method of the matrix optics with respect to the Gaussian beam. The simulation results of the multicomponent optical systems are compared with the experimental data. It is shown that variation in the optical-element location without variation in the general system length and construction of the stability regions as functions of two parameters allow one to speed up the development of the laboratory model.