

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

**А.О. Климин**  
**О.В. Мартынова**  
**Н.Д. Миловский**

**Изучение влияния на мощность генерации  
лазера на халькогениде цинка тепловой  
линзы в его активной среде**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией  
радиофизического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по  
направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика»

*Нижний Новгород*  
2018

УДК 621.373.8

ББК 386-5

К49

К49 Изучение влияния на мощность генерации лазера на халькогенидецинка тепловой линзы в его активной среде: Авторы: Климин А.О., Мартынова О.В., Миловский Н.Д. Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2018. –15с.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент **А.В. Маругин**

В режиме генерации из-за нагрева твердотельной активной среды заметно изменяются некоторые параметры резонатора лазера по сравнению с их невозмущёнными значениями в «холодной» системе. По этой причине экспериментально измеренные характеристики выходного излучения могут существенно отличаться от тех, которые можно рассчитать теоретически по известным параметрам «холодного» резонатора. Целями настоящей работы являются экспериментальное исследование зависимости излучаемой лазером мощности от величины накачки и определение физических причин немонотонного характера этой зависимости с помощью теоретического расчёта характеристик «горячего» резонатора с изменяющейся тепловой линзой, включая анализ возможных дифракционных потерь на всех открытых поверхностях полости.

Работа предназначена для студентов радиофизического факультета четвертого года обучения по направлению подготовки 03.03.03 «Радиофизика», которые прослушали специальные курсы «Асимптотические методы в электродинамике» и «Асимптотические методы теории волн».

Ответственный за выпуск:

зам. председателя методической комиссии радиофизического факультета ННГУ,  
д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 621.373.8

ББК 386-5

## Содержание

1. Введение.....	4
2. Экспериментальная установка.....	5
3. Основы теоретического расчёта ширины гауссова пучка основной моды резонатора .....	6
4. Задания .....	8
5. Инструкция по технике безопасности .....	11
6. Контрольные вопросы .....	12
7. Список литературы .....	14

## 1. Введение

Халькогениды цинка, легированные ионами переходных металлов  $\text{Cr}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$ , являются перспективными материалами для создания перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона и лазерных систем, генерирующих импульсы ультракороткой длительности [1]. В качестве активных элементов обычно применяются кристаллы  $\text{ZnSe}$  с однородным распределением легирующего компонента. Их максимальная выходная мощность и дифференциальная эффективность генерации ограничены влиянием тепловой линзы, образующейся в объеме кристалла в результате термооптических искажений кристаллической решетки под действием излучения накачки [2-4]. Негативный вклад тепловыделения в характеристики генератора уменьшается при использовании активных элементов с неоднородным распределением легирующего компонента по толщине [5,6].

В настоящей работе в качестве рабочего тела лазера используются образцы халькогенида цинка  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  с односторонним профилем легирования, в котором концентрация ионов  $\text{Cr}^{2+}$  достигает максимального значения на одном из торцов и уменьшается внутри слоя по закону, близкому к экспоненциальному (Рис.1). Для уменьшения тепловой нагрузки в режиме генерации образцы закрепляются в медный радиатор с диаметром отверстия  $D_{01}=5$  мм.

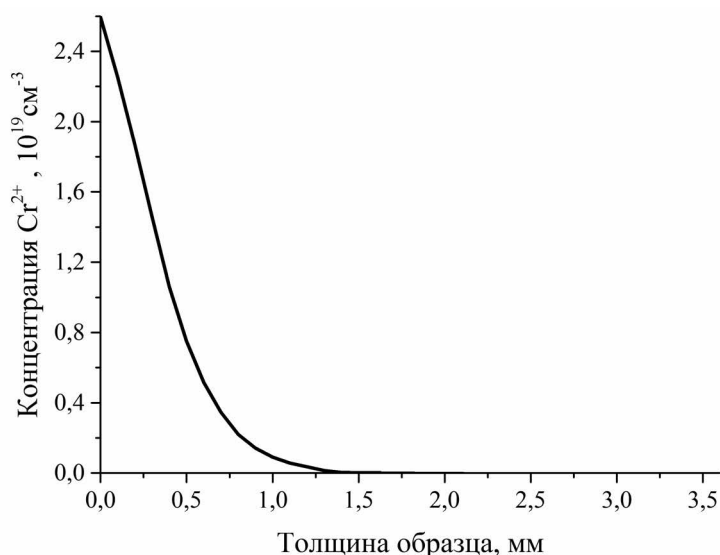


Рис.1. Профили легирования поликристаллов  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$

Целями настоящей работы являются экспериментальное исследование зависимости излучаемой лазером мощности от величины накачки и определение фи-

зических причин немонотонного характера этой зависимости с помощью теоретического расчёта характеристик резонатора с изменяющейся тепловой линзой, включая анализ возможных дифракционных потерь на всех открытых поверхностях полости.

## 2. Экспериментальная установка

На рис. 2 представлена экспериментальная схема лазера на халькогениде цинка с непрерывной накачкой. Резонатор лазера образован плоским выходным

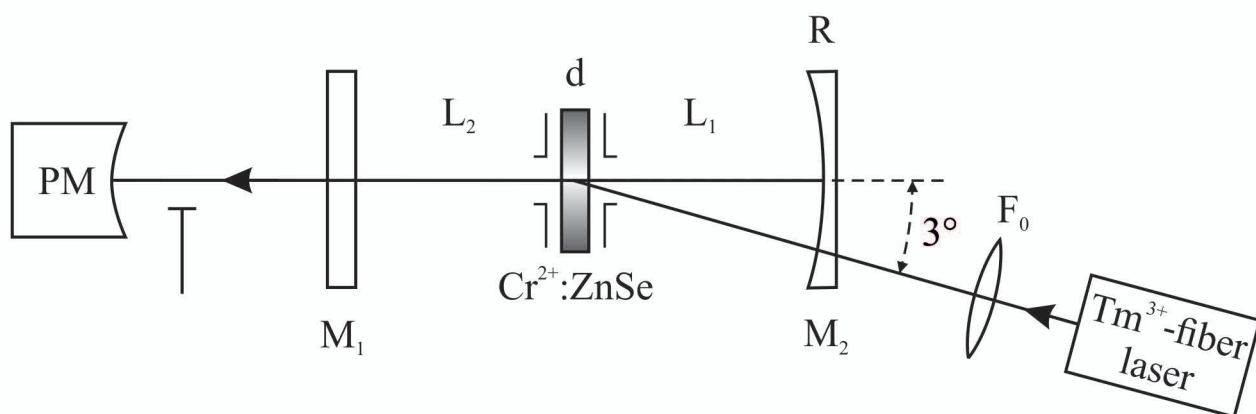


Рис. 2. Схема эксперимента с непрерывной накачкой:  $F_0$  – фокусирующая линза,  $M_1$  – выходное зеркало резонатора,  $M_2$  – сферическое зеркало, PM – измеритель мощности,  $R=50$  мм,  $L_1=22$  мм,  $L_2=5$  мм,  $d=3,6$  мм,  $\bar{n}=2,45$

зеркалом ( $M_1$ ) с пропусканием на длине волны генерации около 8% и дихроичным сферическим зеркалом ( $M_2$ ), имеющим коэффициент отражения более 99.5% на длине волны генерации (в диапазоне 2.1–2.8 мкм) и коэффициент пропускания на длине волны накачки более 90%. Радиус кривизны  $R$  сферического зеркала составляет 50 мм. Диаметры обоих зеркал одинаковы  $D_{1,2}=25$  мм. Полная длина резонатора составляет примерно 30,6 мм. Образец кристалла  $Cr^{2+}:ZnSe$  имеет толщину  $d=3.6$  мм, которая с учётом показателя преломления среды ( $\bar{n}=2,45$ ) почти на 17% увеличивает оптическую длину резонаторной полости лазера. Легированная поверхность образца, имеющая диаметр  $D_0=12,5$  мм, располагается со стороны плоского зеркала  $M_1$ . Перед легированной поверхностью расположена диафрагма диаметром  $D_{01}=5$  мм. Поверхность кристалла, лишённая резонансной примеси  $Cr^{2+}:ZnSe$ , находится от сферического зеркала  $M_2$  на расстоянии

$L_1 = 22$  мм, так что отражённое от зеркала излучение фокусируется (в приближении геометрической оптики) практически в ту область, где размещена резонансная среда  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ .

Для непрерывной накачки используется волоконный  $\text{Tm}^{3+}$ -лазер. Излучение лазера накачки с помощью линзы с фокусным расстоянием  $F_0=50$  мм под малым углом к оси резонатора фокусируется внутри рабочего элемента (в пятно диаметром около 0,1 мм) в область расположения резонансного вещества. Более подробную информацию об используемых образцах  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  и экспериментальной установке можно найти в работе [6].

Структура поля и мощность излучения лазера зависят от характеристик резонатора в режиме генерации, которые из-за образующейся тепловой линзы могут существенно отличаться от характеристик «холодного» резонатора на рис.2. Для эффективной лазерной генерации важную роль (помимо омических потерь) играют потери на дифракцию на зеркалах резонатора, апертуре образца рабочего тела и прочих диафрагмирующих пучок элементах. Величину дифракционных потерь на каждой отражающей излучение  $q$ -той поверхности на оптическом пути ( $z$ ) луча определяет отношение поперечного размера  $a_0(z)$  гауссова пучка основной моды ( $\text{TEM}_{00}$ ) резонансного колебания к размеру апертуры  $\sqrt{\Sigma_q(z)}$  этой поверхности. В неблагоприятном случае  $a_0(z) \geq \sqrt{\Sigma_q(z)}$  дифракционные потери могут многократно превышать 8-процентные омические потери «холодного» резонатора и оказаться невосполнимо большими для осуществления генерации.

### **3. Основы теоретического расчёта ширины гауссова пучка основной моды резонатора**

Характеристики резонатора, включая ширину параксиального гауссова пучка  $a_0(z)$  поля основной моды  $\hat{E}(r, z) = \hat{E}_0(z) \exp[-r^2/2a_0^2(z)]$  в каждом сечении  $z$  его оси, можно определить в геометрооптическом приближении с помощью матричного метода [7, 8] расчёта элементов матрицы  $\hat{S}_{OO'}$  преобразования коор-

динат луча на замкнутом оптическом пути внутри резонансной полости из начального сечения  $O$  в точке  $z$  в конечное сечение  $O'$ , совпадающее с  $O$ .

В геометрической оптике в приближении параксиальности плоских волн ( $|\vec{k}_\perp|/k_z \equiv \text{tg } \theta \cong \sin \theta \cong \theta$ ) с волновыми векторами  $\vec{k} = \vec{k}_\perp + k_z \vec{z}_0$ , образующих моды типа гауссовых пучков в открытых линзовых или подобных им линиях передачи (и соответственно в открытых резонаторах с аналогичной конфигурацией пространства резонансной полости), роль элементарной длины дуги луча  $ds$  играет расстояние  $dz$  по оси центрированной оптической системы (оси линии передачи или оси резонатора). В приближении параксиальности световую точку на траектории реального луча (т.е. лучевой трубки плоской волны с волновым вектором  $\vec{k}$ ) полностью характеризуют вектор  $\vec{r}_\perp$  смещения точки луча от оси системы и вектор  $\vec{s}_\perp$  поперечной составляющей орта  $\vec{s}_0$  лучевого вектора  $\vec{s} = s \vec{s}_0$ . Преобразование компонентов этих векторов (имеющих смысл координат реального луча) на отдельных участках траектории луча описывается с помощью 4-элементных  $\hat{S}_{OO'}$ -матриц, среди которых матрицы преобразования координат луча на участке  $l$  свободного пространства  $(\hat{S}_{OO'})_l \equiv \hat{G}_{l/n}$  и при прохождении через бесконечно тонкую линзу с фокусным расстоянием  $F$   $(\hat{S}_{OO'})_F \equiv \hat{T}_{n/F}$  являются наиболее важными и по своей сути фундаментальными матрицами геометрической оптики.

Элементы матрицы  $\hat{S}_{OO'}$  для замкнутого оптического пути внутри резонатора имеют особый физический смысл в случае, если в сечении  $O$  фазовый фронт комплексной амплитуды  $\hat{E}_0(z)$  является плоским (т.е.  $O$  принадлежит к числу особых сечений резонатора). Два диагональных элемента такой 4-элементной матрицы в каждом конкретном случае будут определять параметр фокусировки резонатора  $g = a_{11} = a_{22}$ , а элемент  $a_{21}$  – эффективную длину резонансной полости  $L_{ef}(z) = a_{21} n$ . При этом параметр фокусировки  $g$ , являясь инвариантом конфигурации резонатора, будет всегда одним и тем же для всех осо-

бых сечений в то время, как эффективная длина, зависящая от местоположения выбранного особого сечения на оптическом пути луча, оказывается функцией координаты  $z$ .

Ширина гауссова пучка поля основной моды резонатора находится по формуле

$$a_0^2(z) = \left( L_{ef} / k \sqrt{1-g^2} \right), \quad (1)$$

где  $k = (\omega/c)n \equiv |\vec{k}|$  – волновое число в среде с показателем преломления  $n$ , заполняющей «холодный» резонатор.

#### 4. Задания

1. Под руководством преподавателя (или инженера) выполнить юстировку Cr:ZnSe-лазера и измерить зависимость мощности генерации Cr:ZnSe-лазера от мощности накачки при помощи калориметрического детектора.

2. При помощи пироэлектрической камеры Ругосат III измерить зависимость радиуса пучка генерации Cr:ZnSe-лазера от мощности накачки в двух плоскостях. Определить расходимость пучка. На основании полученных результатов определить зависимости от мощности накачки радиусов пучков  $(a_0)_1$  на зеркале  $M_1$  и  $(a_0)_3$  на торцевой поверхности кристалла.

3.1. Используя общепринятые представления матриц

$$\hat{G}_{l/n} \equiv \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ l/n & 1 \end{vmatrix}; \quad \hat{T}_{(n/F)} \equiv \begin{vmatrix} 1 & -n/F \\ 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

найти матрицу преобразования координат луча на замкнутом оптическом пути в резонаторе на Рис.2 из плоскости на зеркале  $M_1$  (сечение  $O$ ) в эту же плоскость (сечение  $O'$ )

$$\begin{aligned} (\hat{S}_{OO'})_1 &= \hat{G}_{(L/n)} \hat{T}_{(\bar{n}/f)} \hat{G}_{(d/\bar{n})} \hat{G}_{(l/n)} \hat{T}_{(n/F)} \hat{G}_{(l/n)} \hat{G}_{(d/\bar{n})} \hat{T}_{(\bar{n}/f)} \hat{G}_{(L/n)} = \\ &= \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ L/n & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & -(\bar{n}/f) \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ d/\bar{n} & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ l/n & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & -n/F \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \bullet \end{aligned}$$



$$\bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ l/n & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ d/\bar{n} & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & -(\bar{n}/f) \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ L/n & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} g & a_{12} \\ (L_{ef})_1/n & g \end{vmatrix} \quad (3)_1$$

и представить её элементы  $g$  и  $(L_{ef})_1$  в виде функций фокусного расстояния  $f$ , полагая  $L \equiv L_2 = 5$  мм;  $l \equiv L_1 = 22$  мм;  $F \equiv (R/2) = 25$  мм;  $d = 3.6$  мм;  $\bar{n} = 2.45$ ;  $n = 1$ ,  $f$  – неизвестное фокусное расстояние тепловой линзы.

3.2. Для сравнения найти матрицу преобразования координат луча на замкнутом оптическом пути в резонаторе на Рис.2 из плоскости (особого сечения  $O$ ) в середине эффективной линзы, которая формируется сферическим зеркалом  $M_2$ , в эту же плоскость (сечение  $O'$ )

$$\begin{aligned} (\hat{S}_{OO'})_2 &= \hat{T}_{(n/F)} \hat{G}_{(l/n)} \hat{G}_{(d/\bar{n})} \hat{T}_{(\bar{n}/f)} \hat{G}_{(2L/n)} \hat{T}_{(\bar{n}/f)} \hat{G}_{(d/\bar{n})} \hat{G}_{(l/n)} \hat{T}_{(n/F)} = \\ &= \begin{vmatrix} 1 & -n/F \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ l/n & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ d/\bar{n} & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & -\bar{n}/f \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 2L/n & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & -\bar{n}/f \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \bullet \\ \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ d/\bar{n} & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ l/n & 1 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} 1 & -n/F \\ 0 & 1 \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} g & a_{12} \\ (L_{ef})_2/n & g \end{vmatrix} \quad (3)_2 \end{aligned}$$

и представить параметры  $g$  и  $(L_{ef})_2$  в виде функций фокусного расстояния  $f$ , полагая  $L \equiv L_2 = 5$  мм;  $l \equiv L_1 = 22$  мм;  $F = 2 \bullet (R/2) = 50$  мм;  $d = 3.6$  мм;  $\bar{n} = 2.45$ ;  $n = 1$ ,  $f$  – неизвестное фокусное расстояние тепловой линзы.

4. Используя формулу (1), найти отношение  $[2(a_0)_{1,2}/D_{1,2}]$  удвоенной ширины гауссова пучка поля основной моды резонатора (в режиме генерации) на каждом зеркале к диаметру зеркала и построить графики этих отношений как функции  $f$ , полагая  $D_{1,2} = 25$  мм.

5. Используя полученную в задании 3.1 величину  $(a_0)_1$  и применяя дифракционную формулу (интегральное преобразование) Френеля для расчёта распространяющегося в свободном пространстве параксиального поля

$$\tilde{u}_0(\vec{r}_\perp, z) = \left\{ \frac{ik}{2\pi z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int \tilde{u}_0(\vec{r}'_\perp, 0) \exp\left[-\frac{ik|\vec{r}_\perp - \vec{r}'_\perp|^2}{2z}\right] d\vec{r}'_\perp \right\} \equiv \hat{G}_{(z/k)} \tilde{u}_0(\vec{r}'_\perp, 0), \quad (4)$$

найти ширину гауссова пучка поля основной моды резонатора (в режиме генерации) на (обращённой к зеркалу  $M_1$ ) легированной поверхности образца активной среды  $(a_0)_3$  и сопоставить с результатом расчёта  $(a_0)_3$  в задании 2. Построить зависимость от функции  $f$  отношения  $[2(a_0)_3 / D_{01}]$ , полагая  $D_{01} = 5$  мм;  $\lambda = 2.5$  мкм.

6. Используя полученную в задании 2 зависимость величины  $(a_0)_1$  от мощности накачки и полученную в задании 3.1 зависимость величины  $(a_0)_1$  от фокусного расстояния тепловой линзы  $f$ , построить зависимость фокусного расстояния тепловой линзы  $f$  от мощности накачки.

7. Используя зависимость мощности генерации от мощности накачки в задании 1 и зависимость фокусного расстояния тепловой линзы  $f$  от мощности накачки в задании 6, построить зависимость мощности генерации от фокусного расстояния  $f$  тепловой линзы.

8. Сопоставляя результаты заданий 5 и 7, оценить влияние дифракционных потерь на торцевой поверхности кристалла на мощность генерации лазера на халькогениде цинка, допированного ионами хрома.

## **5. Инструкция по технике безопасности**

1. Инструкция обязательна для всех студентов, выполняющих настоящую лабораторную работу. За невыполнение требований инструкции студенты несут ответственность в дисциплинарном порядке.

2. До начала эксперимента необходимо изучить описание установки и настоящую инструкцию.

3. В работе на установке должны участвовать не менее двух человек одновременно. Запрещается приступать к экспериментальной работе в отсутствие преподавателя или инженера кафедры.

4. Запрещается покидать лабораторию, оставляя без присмотра установку включённой.

5. После окончания оптической юстировки запрещается:

- 1) касаться камеры и токонесущих проводов;
- 2) перекрывать какой-либо частью собственного тела оптический путь луча лазера.

6. В случае поражения электрическим током необходимо:

- 1) обесточить установку с помощью выключателя на щите у входной двери в лабораторию;
- 2) сообщить о произошедшем случае преподавателю или инженеру;
- 3) оказать пострадавшему первую медицинскую помощь.

## 6. Контрольные вопросы

1. Почему в оптическом диапазоне длин волн применяются открытые резонаторы?
2. Элементарная теория резонатора Фабри-Перо в приближении геометрической оптики. Рассчитать добротность резонатора с плоскими зеркалами.
3. Мода резонатора и её основные характеристики: частота, коэффициент затухания, добротность, полоса, структура поля.
4. Расчёт омических потерь открытого резонатора.
5. Физический смысл коэффициента трансформации моды (собственной волны) на один период системы в линзовом волноводе.
6. Физический смысл собственного значения интегрального уравнения для поля моды резонатора (линзового волновода).
7. Конечные размеры зеркал, параметр Френеля и дифракционные потери.
8. Характеристическое уравнение для мод резонатора и дисперсионное уравнение для мод (соответствующего ему) линзового волновода.
9. Уравнение поперечной диффузии лучевой амплитуды параксиального волнового пучка и его решение с помощью функции Грина.
10. Связь уравнения Гельмгольца и уравнения поперечной диффузии лучевой амплитуды параксиального волнового пучка.
11. Связь решений уравнения Гельмгольца и уравнения поперечной диффузии лучевой амплитуды волнового пучка.
12. Симметричная форма уравнения Фредгольма второго рода для поля моды резонатора (или линзового волновода). Параметр фокусировки, эквивалентная длина элементарной ячейки периодической системы.
13. Собственные функции и собственные значения уравнения Фредгольма для полей мод недиафрагмированных резонаторов (или линзовых линий). Функции Эрмита и их основные свойства. Гауссов пучок.

14. Области энергетически реализуемых мод резонатора в квазиоптике и области устойчивости линзовых линий передачи при описании распространения лучей в приближении геометрической оптики.

15. Определить области энергетически реализуемых мод резонатора, изображенного на рис. 2.

16. Найти частоты мод недифрагмированного резонатора, имеющего параметр фокусировки  $g_0$ .

17. Найти параметр фокусировки и частоты мод конфокального резонатора.

18. Найти параметр фокусировки и частоты мод софокусного резонатора.

19. Структура поля моды  $TEM_{mnq}$  резонатора с зеркалами прямоугольной формы.

20. Каустика моды  $TEM_{mnq}$  на зеркале резонатора, изображенного на рис. 2.

21. Используя  $S$ -матрицы преобразования координат луча тонкой линзой и участком свободного пространства, найти для резонатора, представленного на рис. 2, параметр фокусировки и границы области энергетически реализуемых мод.

22. Система уравнений полуклассического описания взаимодействия электромагнитного поля и твердотельной двухуровневой среды.

23. Однородное и неоднородное уширение линии люминесценции твердотельной активной среды.

24. Физические свойства халькогенида цинка в режиме нагрева оптической накачкой и его модель при квазиоптическом описании структуры поля генерируемых лазером мод.

25. Как определить параметры комплексного фокусного расстояния  $F_R$  линзы, моделирующей вклад халькогенида цинка в характеристики резонансной системы рубинового лазера? Почему при расчёте реальной части  $F_R$  можно пренебречь мнимой частью? Как оценить ошибку расчёта?

## 7. Список литературы

1. Sorokina, I.T. Cr<sup>2+</sup>-doped II–VI materials for lasers and nonlinear optics // Opt. Mater. – 2004. – V. 26. – I. 4. – P. 395–412.
2. Зверев Г.М., Голяев Ю.Д. Лазеры на кристаллах и их применение. – М.: Радио и связь, 1994. – 312 с.
3. Тарасов Л.В. Физика процессов в генераторах оптического когерентного излучения. – М.: Радио и связь, 1981. – 440 с.
4. Schepler, K.L., Peterson, R.D., Berry, P.A. Thermal effects in Cr<sup>2+</sup>:ZnSe thin disk lasers // IEEE J. Sel. Topics Quant. Elect. – 2005. – V.11. – I.3. – P. 713–720.
5. Savin, D.V., Gavrishchuk, E.M., Ikonnikov, V.B. Laser generation in polycrystalline Cr<sup>2+</sup>:ZnSe with undoped faces // Quantum Electron. – 2015. – V.45. – I.1. – P. 8–10.
6. Kurashkin, S.V., Martynova, O.V., Savin, D.V., Gavrishuk, E.M., Rodin, S.A., Savikin, A.P. Doping profile influence on a polycrystalline Cr<sup>2+</sup>:ZnSe laser efficiency // Laser Phys. Lett. – 2018. – V.15. – 025002.
7. Миловский Н.Д. Асимптотические методы в теории волн. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 138 с.
8. Джеррард А., Бёрч Дж. М. Введение в матричную оптику. – М.: Мир, 1978. – 343 с.

# **Изучение влияния на мощность генерации лазера на халькогениде цинка тепловой линзы в его активной среде**

Андрей Олегович Климин  
Ольга Владимировна Мартынова  
Николай Дмитриевич Миловский

## ***Практикум***

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования «Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского».  
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.