

УДК 621.375.826

# Применение неустойчивого оптического резонатора в малогабаритном электро- разрядном DF-лазере\*

С. Д. Великанов, Н. А. Зарецкий,  
Р. В. Порубов

*Проанализированы различные конфигурации неустойчивого оптического резонатора телескопического типа. Показано, что такой резонатор позволяет достичь расходимости лазерного излучения, близкой к ее дифракционному пределу, а также эффективно управлять ею в достаточно широком диапазоне без использования дополнительных оптических элементов в системе. Применение неустойчивого оптического резонатора позволяет улучшить стабильность пространственных и энергетических характеристик лазерного излучения при угловых разъюстировках зеркал оптического резонатора.*

## Введение

В работе исследовались возможности применения на лазерной установке неустойчивого оптического резонатора (ОР) телескопического типа с целью уменьшения влияния механических воздействий на угловое положение зеркал ОР и, следовательно, выходные характеристики лазерного излучения (ЛИ), а также достижения требуемого уровня пространственных и энергетических характеристик ЛИ у малогабаритного электроразрядного лазера с применением неустойчивого ОР.

Перед исследователями стояли следующие задачи:

- провести экспериментальные и расчетно-теоретические исследования пространственных и энергетических характеристик ЛИ на лазерной установке с неустойчивым ОР;
- исследовать возможность управления пространственными характеристиками ЛИ лазера на неустойчивом ОР;
- исследовать влияние угловой разъюстировки зеркал ОР на стабильность пространственных и энергетических характеристик ЛИ;
- показать различия между неустойчивым ОР телескопического типа и соответствующим плоскопараллельным резонатором по энергетическим и пространственным характеристикам ЛИ при угловых разъюстировках зеркал ОР.

В качестве лазерной установки (ЛУ) в экспериментах использовался малогабаритный электроразрядный импульсно-периодический DF-лазер с замкнутым циклом смены активной среды. В работе исследованы конфокальный (софокусный) и расфокусированные (разъюстированные по длине) неустойчивые ОР, а также ОР с передним зеркалом в виде линзового мениска.

---

\* Доклад на VII школе по лазерной физике. Москва, 18–20 июня 2013 г.

Схематично конструкция конфокального неустойчивого ОР показана на рис. 1,а. Для него справедливо равенство [1]

$$L = f_1 - f_2, \quad (1)$$

где  $L$  – геометрическая длина ОР (расстояние между зеркалами);  $f_1$  – фокусное расстояние заднего зеркала;  $f_2$  – фокусное расстояние переднего зеркала.

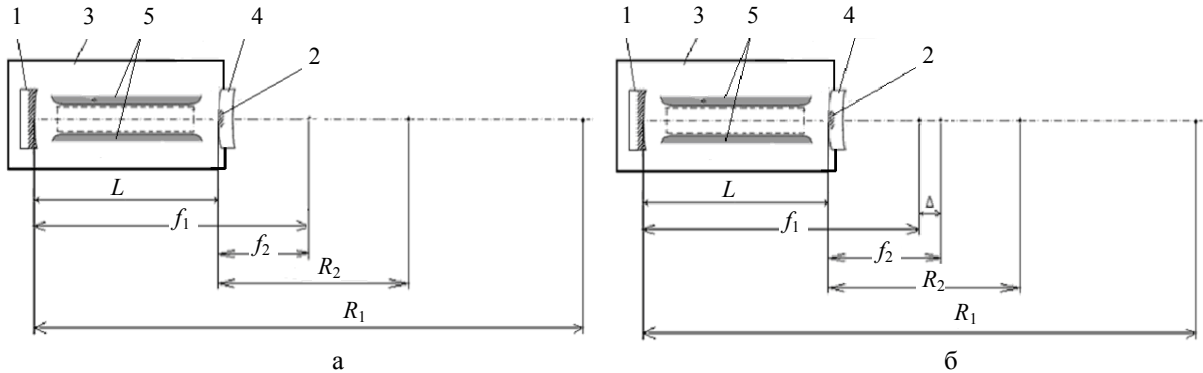


Рис. 1. Конструкция конфокального неустойчивого ОР (а) и расфокусированного неустойчивого ОР (б): 1 – заднее зеркало, радиус кривизны поверхности  $R_1$ ; 2 – переднее зеркало, нанесенное на поверхность афокального мениска по центру; 3 – герметичный газовый объем рабочей камеры лазера; 4 – афокальный мениск, радиусы кривизны поверхностей  $R_2 \approx R_3$ ; 5 – электроды основного разряда (межэлектродный промежуток 10 мм);  $L$  – геометрическая длина ОР (расстояние между зеркалами);  $f_1$  – фокусное расстояние заднего зеркала ( $f_1 = R_1/2$ );  $f_2$  – фокусное расстояние переднего зеркала ( $f_2 = R_2/2$ );  $\Delta$  – разность между положением фокальных плоскостей заднего и переднего зеркал (смещение фокуса переднего зеркала)

Конфокальный неустойчивый ОР формирует пучок излучения с плоским волновым фронтом (в приближении геометрической оптики). Сечение пучка на выходе ограничивается диафрагмой размером  $10 \times 10$  мм.

Неустойчивый оптический резонатор называется расфокусированным (разъюстированным по длине), когда фокальные плоскости его заднего и переднего зеркал находятся на расстоянии  $\Delta$  друг от друга (рис. 1,б). Смещение  $\Delta$  может быть как положительным, так и отрицательным [2]. Для такого ОР радиус кривизны волнового фронта  $R'_2$  выходного пучка равен радиусу кривизны волны данного ОР и определяется по формуле [2]

$$R'_2 = f_1 + \frac{(f_1)^2 - (f_2)^2}{\Delta}, \quad (2)$$

где  $R'_2$  – радиус кривизны волнового фронта выходного пучка данного ОР.

Схема конструкции конфокального (софокусного) неустойчивого ОР с передним зеркалом в виде линзового мениска показана на рис. 2. Линзовый мениск имеет оптическую силу  $D$ , при этом радиус кривизны волнового фронта выходного пучка будет равен  $R'_2 = 1/D$ .

Основными параметрами неустойчивого ОР, которые необходимо рассчитать и выбрать, являются:  $L$ ,  $R_1$  – радиус кривизны поверхности заднего зеркала,  $R_2$  ( $R_3$ ) – радиусы кривизны поверхностей мениска и  $D_2$  – размер переднего зеркала.

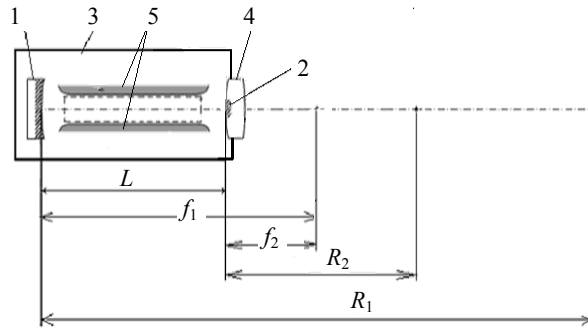


Рис. 2. Конструкция конфокального (софокусного) неустойчивого ОР с передним зеркалом в виде линзового мениска: 4 – линзовый мениск, радиусы кривизны поверхностей  $R_2 \neq R_3$  (остальные обозначения см. на рис. 1)

Эти параметры определяют работу ОР в целом и влияют на выходную энергию импульсов ЛИ, угол расходимости импульсов ЛИ, угол отклонения оси диаграммы направленности импульсов ЛИ относительно начального положения.

Для конфокального и расфокусированного неустойчивых ОР перечисленные параметры можно определить с помощью коэффициента увеличения  $M$  [2]. Относительное смещение положения луча на переднем зеркале ОР за один проход называется коэффициентом увеличения  $M$  и определяются по формуле

$$M = -\frac{f_1}{f_2} \left[ 1 - \frac{\Delta^2}{(f_1)^2 - (f_2)^2} \right]. \quad (3)$$

Определение оптимального значения коэффициента увеличения  $M$  является одной из главных задач при расчете неустойчивого ОР.

*Расфокусированный неустойчивый ОР «увеличенной» длины.*

В качестве расфокусированного неустойчивого ОР «увеличенной» длины в ЛУ использовался ОР с коэффициентом увеличения  $M \approx 2$  и параметрами:  $L = 314,4$  мм;  $R_1 = 1081,4$  мм;  $R_2 = 549,5$  мм;  $\Delta = 48,45$  мм;  $R_2' \approx 5020$  мм;  $D_2 = 4,6$  мм.

Схема измерений распределения интенсивности ЛИ в дальней зоне показана на рис. 3. Экспериментальное распределение интенсивности лазерного излучения в дальней зоне приведено на рис. 4. Экспериментальное значение угла расходимости импульсов ЛИ по уровню 50 % энергии для данного ОР составило 6,2 угл. минуты, что хорошо согласуется с расчетными значениями [3]. Экспериментальная зависимость угла отклонения оси диаграммы направленности импульсов ЛИ  $\beta$  от угла отклонения переднего зеркала  $\alpha$  для этого ОР имела вид  $\beta \approx 2,5\alpha$ .

Максимальное значение выходной энергии импульсов ЛИ с данным типом ОР составило порядка 25–27 мДж.

*Расфокусированный неустойчивый ОР «уменьшенной» длины.*

В качестве расфокусированного неустойчивого ОР «уменьшенной» длины в ЛУ использовался ОР с коэффициентом увеличения  $M \approx 3$  и параметрами:  $L = 324,4$  мм;  $R_1 = 1081,4$  мм;  $R_2 = 353,2$  мм;  $\Delta = -39,7$  мм;  $R_2' \approx -6040$  мм.

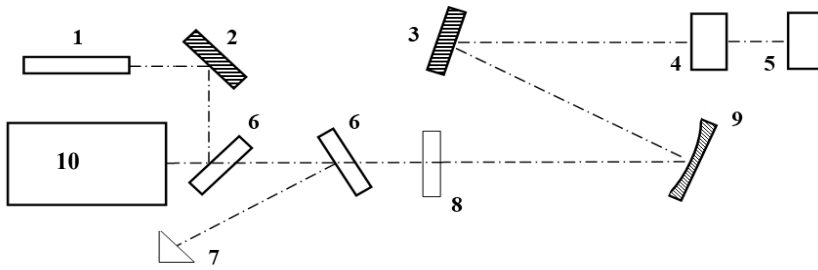


Рис. 3. Схема измерений расходимости ЛИ: 1 – юстировочный лазер; 2, 3 – алюминиевое плоское зеркало; 4 – матричная пироэлектрическая камера Ругосам-III фирмы Ophir; 5 – компьютер; 6 – плоскопараллельная пластина из ФКИ; 7 – пироэлектрическая измерительная головка Coherent; 8 – оптический ослабитель; 9 – сферическое алюминиевое зеркало, фокусное расстояние  $f' = 1000$  мм; 10 – ЛУ

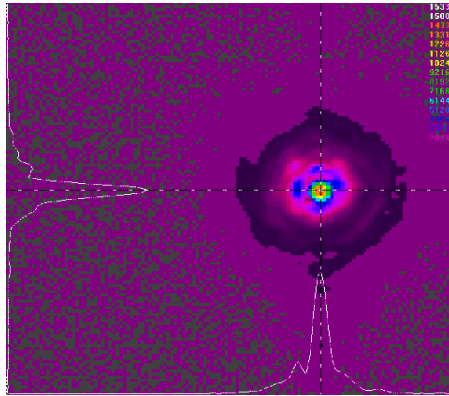


Рис. 4. Экспериментальное распределение интенсивности ЛИ в дальней зоне в случае расфокусированного неустойчивого ОР «увеличенной» длины

Экспериментальное значение угла расходимости импульсов ЛИ по уровню 50 % энергии для данного ОР составило 4,9 угл. минуты, что хорошо согласуется с расчетными значениями [3]. Экспериментальная зависимость угла отклонения оси диаграммы направленности импульсов ЛИ  $\beta$  от угла отклонения переднего зеркала  $\alpha$  для этого ОР имела вид  $\beta \approx 0,9\alpha$ . Максимальное значение выходной энергии импульсов ЛИ с данным типом ОР составило 21–22 мДж.

В качестве расфокусированного неустойчивого ОР «уменьшенной» длины в ЛУ также использовался ОР с коэффициентом увеличения  $M \approx 1,72$ . Экспериментальное значение угла расходимости импульсов ЛИ по уровню 50 % энергии для данного ОР составило 6,4 угл. минуты, что хорошо согласуется с расчетными значениями. Теоретическая зависимость угла отклонения оси диаграммы направленности импульсов ЛИ  $\beta$  от угла отклонения переднего зеркала  $\alpha$ , вычисляемая по формуле

$$\beta = \frac{R_2 \alpha}{R_1 - R_2 - L}, \quad (4)$$

для этого ОР имела вид  $\beta \approx 2,2\alpha$ .

*Конфокальный (софокусный) неустойчивый ОР с передним зеркалом в виде линзового мениска.*

В качестве конфокального неустойчивого ОР с передним зеркалом в виде линзового мениска в ЛУ использовался ОР с коэффициентом увеличения  $M = 2,39$  и параметрами:  $L = 314,4$  мм;  $R_1 = 1081,4$  мм;  $R_2 = 452,7$  мм;  $R_3 = 599,8$  мм;  $R_2' = f = 4424$  мм.

Экспериментальное значение угла расходимости импульсов ЛИ по уровню 50 % энергии для данного ОР составило 6,6 угл. минуты (рис. 5), что хорошо согласуется с расчетными значениями. Теоретическая зависимость угла отклонения оси диаграммы направленности импульсов ЛИ  $\beta$  от угла отклонения переднего зеркала  $\alpha$  для этого ОР имела вид  $\beta \approx 1,44\alpha$ . Максимальное значение выходной энергии импульсов ЛИ составило 19–20 мДж.

Отметим, что распределение интенсивности ЛИ в дальней зоне для линзового ОР имеет характерное смещение в сторону боковых максимумов (см. рис. 5).

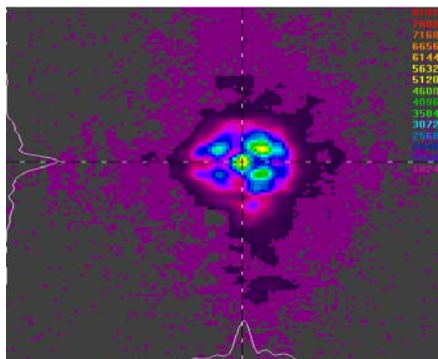


Рис. 5. Экспериментальное распределение интенсивности ЛИ в дальней зоне в случае софокусного неустойчивого ОР с передним зеркалом в виде линзового мениска

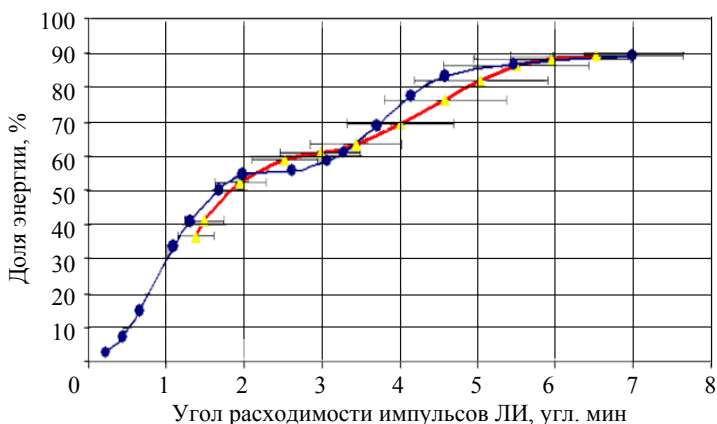


Рис. 6. Экспериментальная (▲) и расчетная (●) зависимости доли энергии ЛИ в угле расходимости

#### Конфокальный (софокусный) неустойчивый ОР.

В качестве конфокального (софокусного) неустойчивого ОР в ЛУ использовался ОР с коэффициентом увеличения  $M = 2,39$  и параметрами  $L = 314,4$  мм;  $R_1 = 1081,4$  мм;  $R_2 = 452,7$  мм. Фокальные плоскости зеркал ОР совпадают, и такой неустойчивый ОР формирует на выходе плоский волновой фронт [4].

По измеренному распределению интенсивности ЛИ в дальней зоне получена экспериментальная зависимость доли энергии ЛИ в угле расходимости (рис. 6). Отметим, что экспериментальная и расчетная зависимости доли энергии ЛИ в угле расходимости хорошо согласуются друг с другом. Как видно из рис. 6, измеренная расходимость импульсов ЛИ для данного неустойчивого ОР близка к ее дифракционному пределу.

Экспериментальные исследования на лазерной установке с плоскопараллельным ОР (типа Фабри – Перо) показали, что основной причиной ухудшения пространственных характеристик ЛИ в процессе работы является угловая разъюстировка зеркал ОР.

Экспериментально определены зависимости угла расходимости ЛИ (рис. 7), зависимости угла отклонения оси диаграммы направленности ЛИ (рис. 8) и зависимости выходной энергии ЛИ от угла отклонения переднего зеркала ОР (рис. 9). Для сравнения те же самые зависимости приведены для соответствующего плоскопараллельного ОР. Максимальное значение выходной энергии импульсов ЛИ с данным типом ОР составило 25 мДж.

Таким образом, разъюстировка зеркал неустойчивого ОР в значительно меньшей степени влияет на изменение угла расходимости, угла отклонения оси диаграммы направленности и выходной энергии импульсов ЛИ по сравнению с соответствующим плоскопараллельным ОР. При-

менение неустойчивого ОР позволяет улучшить стабильность пространственных и энергетических характеристик ЛИ при угловых разбюстировках зеркал ОР.

Как было показано выше, неустойчивый ОР телескопического типа позволяет эффективно управлять расходимостью ЛИ в достаточно широких пределах. Если выбрать радиус кривизны переднего зеркала таким, что фокальные плоскости заднего и переднего зеркал ОР не будут совпадать, то такой расфокусированный ОР будет формировать на выходе неплоский волновой фронт [2]. Радиус кривизны волнового фронта пучка определяется по формуле (2). Радиус кривизны волнового фронта пучка определяет угол расходимости ЛИ.

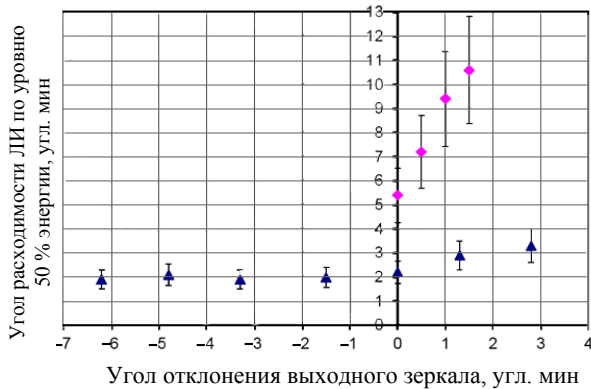


Рис. 7. Экспериментальная зависимость угла расходимости ЛИ по уровню 50 % энергии от угла отклонения переднего зеркала ОР: ▲ – неустойчивый ОР; ◆ – плоский ОР

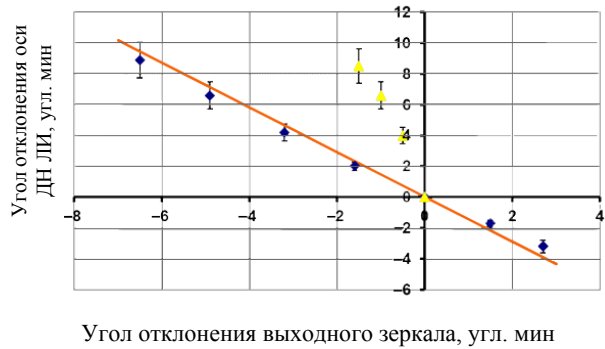


Рис. 8. Зависимость угла отклонения оси диаграммы направленности ЛИ от угла отклонения переднего зеркала ОР: ◆ – неустойчивый ОР (эксперимент); — – неустойчивый ОР (расчет); ▲ – плоский ОР

Экспериментальная зависимость угла расходимости ЛИ по уровню 50 % энергии от радиуса кривизны волнового фронта пучка ЛИ показана на рис. 10. С увеличением радиуса кривизны волнового фронта пучка волновой фронт становится плоским, а угол расходимости ЛИ уменьшается и стремится к его дифракционному пределу.

Экспериментальная зависимость угла расходимости ЛИ по уровню 50 % энергии от коэффициента увеличения  $M$  для различных радиусов кривизны волнового фронта выходного пучка, показанная на рис. 11, хорошо согласуется с расчетными данными.

Экспериментальные зависимости угла отклонения оси диаграммы направленности ЛИ  $\beta$  от угла наклона переднего зеркала  $\alpha$  неустойчивого ОР при различных значениях коэффициента увеличения  $M$  (рис. 12) хорошо согласуются с расчетными.

На рис. 13 показана экспериментальная зависимость отношения угла отклонения оси диаграммы направленности ЛИ  $\beta$  к углу наклона переднего зеркала  $\alpha$  телескопического ОР от коэффициента увеличения  $M$ . Зависимость имеет обратный характер.

Определены экспериментальные значения энергии импульсов ЛИ с использованием различных конфигураций неустойчивого ОР. На рис. 14 показана экспериментальная зависимость энергии ЛИ от коэффициента отражения переднего зеркала для плоскопараллельного ОР и от эффективного коэффициента отражения переднего зеркала для неустойчивого ОР. На рис. 15 приведена экспериментальная зависимость выходной энергии ЛИ от коэффициента увеличения  $M$  для неустойчивого ОР.

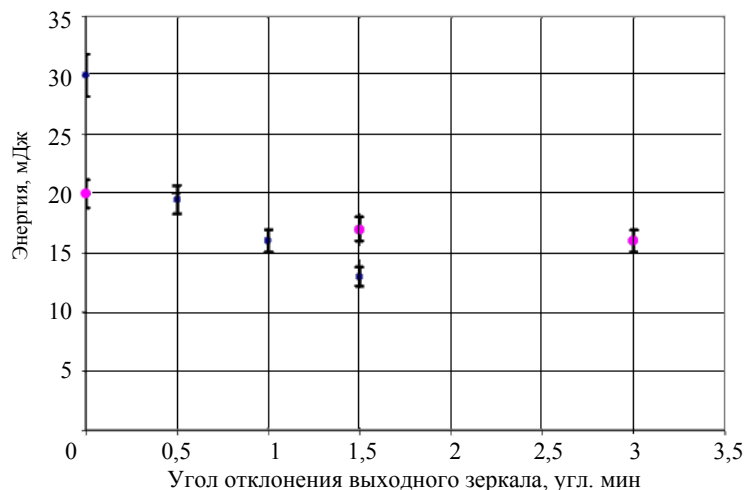


Рис. 9. Экспериментальная зависимость выходной энергии ЛИ от угла отклонения переднего зеркала ОР: ■ – плоский ОР; ● – неустойчивый ОР

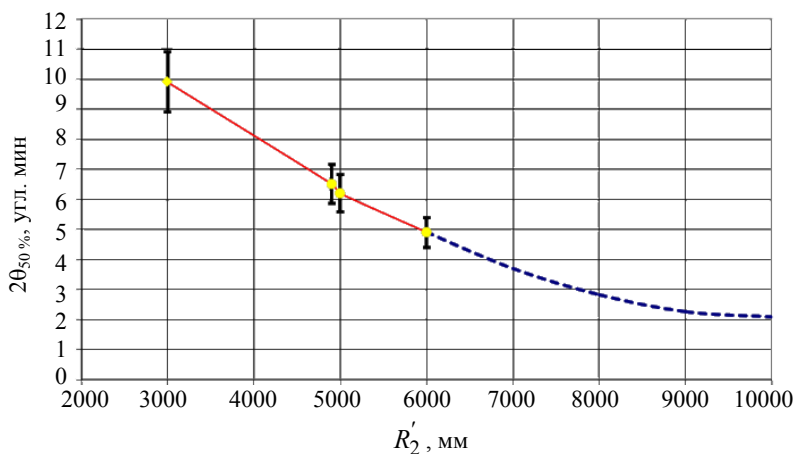


Рис. 10. Экспериментальная зависимость угла расходимости ЛИ по уровню 50 % энергии от радиуса кривизны волнового фронта пучка

В целом уменьшение энергии генерации ЛИ на телескопическом ОР может быть связано с худшими характером заполнения активного объема энергией генерации [4].

В связи с разрушением в химической активной среде оптических покрытий на передних зеркалах ОР был предложен расфокусированный неустойчивый ОР с коэффициентом увеличения  $M \approx 2$  и передним зеркалом, нанесенным на поверхность афокального мениска, расположенную вне активной газовой среды.

Данный ОР характеризовался следующими параметрами:  $L = 314,4$  мм;  $R_1 = 1081,4$  мм;  $R_2 = 549,5$  мм;  $R_3 = 539,5$  мм. Диаметр переднего зеркала  $D_2 = 4,3$  мм, покрытие – медь и интерференционная пара  $YF_3$ -ZnSe (покрытие находилось не в химической среде). Характерные экспериментальные распределения интенсивности лазерного излучения в дальней зоне соответствуют распределению на рис. 4.

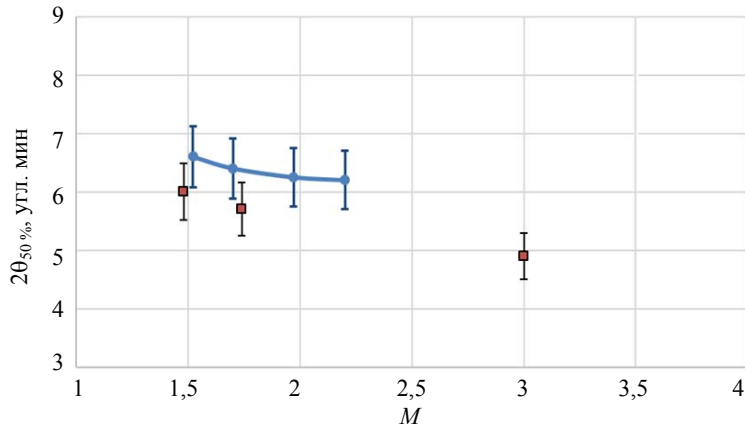


Рис. 11. Экспериментальная зависимость угла расходимости ЛИ по уровню 50 % энергии от коэффициента увеличения  $M$  для радиуса кривизны волнового фронта пучка:  $\bullet$  –  $R'_2 = 5000$  мм;  $\blacksquare$  –  $R'_2 \approx 6000$  мм

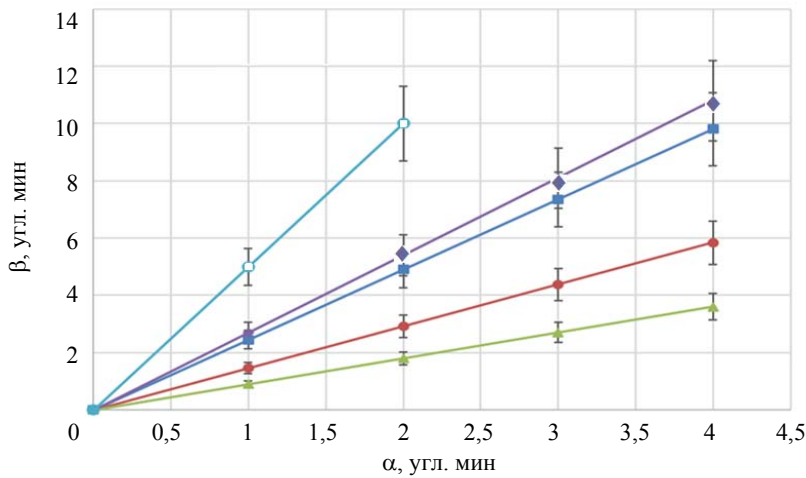


Рис. 12. Экспериментальная зависимость угла отклонения оси диаграммы направленности ЛИ от угла наклона переднего зеркала при  $M = 2$  ( $\blacksquare$ );  $2,2$  ( $\bullet$ );  $3$  ( $\blacktriangle$ );  $1,7$  ( $\blacklozenge$ );  $1,5$  ( $\circ$ )

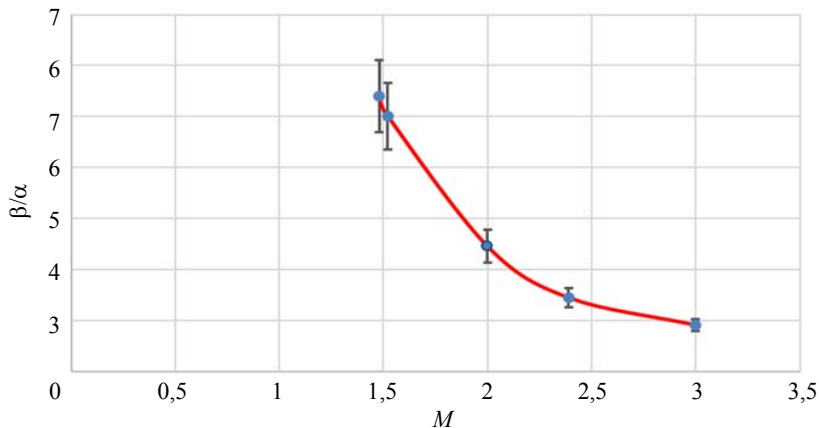


Рис. 13. Экспериментальная зависимость отношения угла отклонения оси диаграммы направленности ЛИ к углу наклона переднего зеркала  $\alpha$  от коэффициента увеличения  $M$



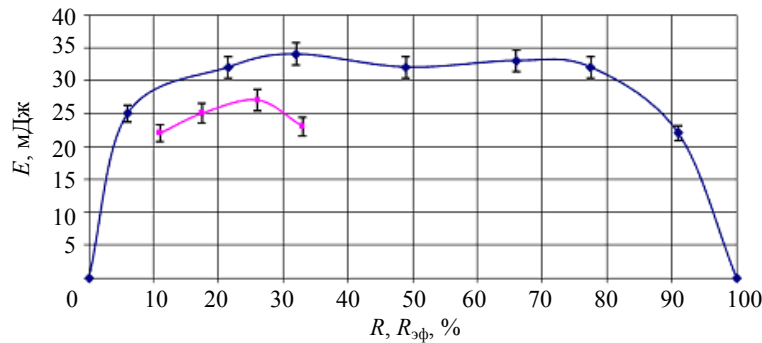


Рис. 14. Экспериментальная зависимость выходной энергии импульсов ЛИ от коэффициента отражения  $R$  переднего зеркала плоскопараллельного ОР и от эффективного коэффициента отражения  $R_{\text{эф}}$  переднего зеркала неустойчивого ОР: ● – плоскопараллельный ОР; ● – неустойчивый ОР

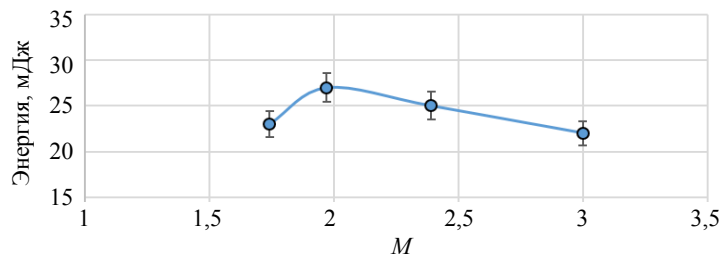


Рис. 15. Экспериментальная зависимость выходной энергии импульсов ЛИ от коэффициента увеличения  $M$

## Выводы

1. Экспериментальным и расчетно-теоретическим путем определены пространственные и энергетические характеристики ЛИ лазера с неустойчивым ОР телескопического типа. Для сравнительного анализа приведены результаты экспериментов с ОР типа Фабри–Перо, состоящего из плоскопараллельных зеркал. Показано, что применение неустойчивого ОР приводит к уменьшению выходной энергии ЛИ на 20 % по сравнению с плоскопараллельным ОР и позволяет достичь расходимости ЛИ близкой к ее дифракционному пределу.

2. Неустойчивый ОР позволяет эффективно управлять расходимостью ЛИ без использования дополнительных оптических элементов в широком диапазоне посредством изменения радиусов кривизны зеркал. Определены зависимости угла расходимости ЛИ от параметров ОР. Показано, что применение неустойчивого ОР позволяет улучшить стабильность пространственных характеристик ЛИ при угловых разъюстировках зеркал: угол расходимости и угол отклонения оси диаграммы направленности ЛИ значительно меньше зависят от угловых разъюстировок зеркал, чем в случае с плоскопараллельным ОР.

3. Применение неустойчивого ОР позволяет улучшить стабильность энергетических характеристик ЛИ при угловых разъюстировках зеркал. Показано, что применение неустойчивого ОР телескопического типа для электроразрядных газовых лазеров позволяет упростить конструкцию ОР, так как переднее зеркало наносится на выходное окно газовой камеры; при этом можно использовать металлические покрытия вместо сложных многослойных диэлектрических покрытий. Показано также, что при нанесении металлического покрытия на внешнюю поверхность мениска

можно значительно увеличить ресурс работы переднего зеркала, так как покрытие не подвергается воздействию химической среды, находящейся внутри газовой камеры.

Таким образом, неустойчивый ОР телескопического типа может успешно применяться в малогабаритных электроразрядных химических лазерах, при этом обеспечивать стабильные пространственные и энергетические характеристики ЛИ. Полный цикл испытаний на лазерной установке с неустойчивым ОР показал, что при воздействии внешних факторов (вибрации и температуры) все параметры ЛИ лазера сохраняют стабильность в требуемом диапазоне.

### Список литературы

1. Гросс Р., Ботт Д. Химические лазеры. – М.: Мир, 1980.
2. Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г. и др. Эволюция гауссовых пучков и импульсная генерация в лазерах с неустойчивыми резонаторами // Квантовая электроника. 1975. Т. 2, № 6. С. 1125–1137.
3. Серов Р., Малютин А. и др. FRESNEL 4.8. – М., 2010.
4. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. – М.: Наука, 1990.

## The Application of an Unstable Optical Resonator in a Compact Electric-Discharge DF-Laser

S. D. Velikanov, N. A. Zaretsky, R. V. Porubov

*Analysis of different configurations of the unstable telescopic optical resonator has been carried out.*

*It has been shown that with the application of the unstable telescopic optical resonator it is possible to achieve the laser radiation divergence close to its diffraction limit and it is possible to control the laser radiation divergence effectively in quite wide range without using additional optical elements in the system.*

*It has been demonstrated that the application of the unstable optical resonator allows to improve the stability of spatial and energy characteristics of laser emission under angular misalignments of the optical resonator mirrors.*