

УДК 621.375.826

В.В. Осипов, А.Н. Орлов, К.В. Баянов, В.Ф. Лосев

ФОРМИРОВАНИЕ ОСНОВНОЙ МОДЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ХеСІ-ЛАЗЕРА И УМЕНЬШЕНИЕ ЕЕ РАСХОДИМОСТИ

Исследуется расходимость лазерного излучения эксимерного ХеСІ-лазера. Приведены диаграммы направленности излучения неустойчивых резонаторов различных конфигураций, измеренные в дальней зоне.

Приводятся исследования по влиянию скорости прокачки газовой смеси и частоты импульсов на расходимость ХеСІ-лазера.

Введение

Излучение эксимерных лазеров с устойчивыми резонаторами, как правило, обладает расходимостью $< 10^{-2}$ рад. И хотя при этом достигаются максимальный уровень энергии излучения и высокий КПД, область применения лазера с большой расходимостью сильно ограничена, прежде всего из-за невозможности фокусировки излучения в небольшое пятно. Уменьшение расходимости излучения эксимерных лазеров, в основном, достигается использованием неустойчивых резонаторов [1–3], которые позволяют сузить диаграмму направленности пучка в десятки раз, а в некоторых благоприятных условиях достичь 1,2–1,5 дифракционной расходимости для основной моды излучения. Однако следует отметить, что получение таких предельных параметров пучка приводит к значительному уменьшению энергии генерации [3]. Лишь в особых случаях можно избежать потери в выходной энергии [4].

Неустойчивые резонаторы достаточно подробно описаны в [4–8], где можно найти, казалось бы, исчерпывающую информацию по выбору оптимального резонатора для любого лазера. Однако из-за существенного влияния на расходимость ряда параметров лазера, таких как длительность и энергия импульса излучения, размеры активной среды, коэффициент усиления среды, а также aberrации на оптических деталях резонатора, формирование основной моды излучения с дифракционной расходимостью без значительной потери энергии излучения в каждом конкретном случае является весьма непростой задачей.

В настоящее время в литературе практически отсутствуют работы по исследованию влияния скорости прокачки газовой смеси и частоты следования импульсов на расходимость излучения ХеСІ-лазера.

В настоящей статье представлены результаты исследования влияния различных типов резонаторов, скорости прокачки газа и частоты следования

импульсов на расходимость и фокусировку лазерного излучения.

Экспериментальная установка

Исследования расходимости излучения проводились на эксимерном ХеСІ-лазере ЛГЭ-100/400 с выходной мощностью излучения до 100 Вт и частотой следования импульсов до 400 Гц. Объем газовой кюветы лазера составлял 235 л. Прокачка газовой смеси со скоростью 18 м/с через межэлектродный промежуток осуществлялась с помощью диаметального вентилятора с магнитной муфтой. Частота вращения вентилятора плавно менялась от 0 до 2000 об/мин посредством специального привода типа ЭПУ-1-2. Объем активной зоны, образованный между двумя профилированными электродами из меди, составил $1,5 \times 2,6 \times 100$ см³. Давление газовой смеси He:Хе:НСІ:Н₂ = 1000:10:1:0,5 равнялось 2,5 атм и не менялось в ходе экспериментов.

Для возбуждения активной среды использовался генератор высоковольтных импульсов, собранный по схеме Блюмляйна с магнитным звеном сжатия. В качестве коммутатора применялся специальный тиратрон ЭКСТРА 3-15000/35.

В ходе экспериментов применялись три типа резонаторов, схематически изображенных на рис. 1.

В случае использования неустойчивых резонаторов *A* и *B* расстояние между зеркалами Z_1 и Z_2 составляло 178 см. Радиусы кривизны зеркал резонатора *A* равнялись $R_1 = 360$ см, $R_2 = \infty$, а резонатора *B* – $R_1 = 360$ и $R_2 = 544$ см.

Фокусные расстояния зеркал самофильтрующего резонатора были выбраны следующими: $F_1 = 206,5$ см, $F_2 = 30,2$ см. Диаметр отверстия выходного зеркала, просверленного под углом 45°, составлял 2 мм. В ходе экспериментов в фокусе зеркал Z_1 и Z_2 помещался экран с калиброванными отверстиями, что позволяло устанавливать диаметр отверстия от 0,5 до 2 мм.

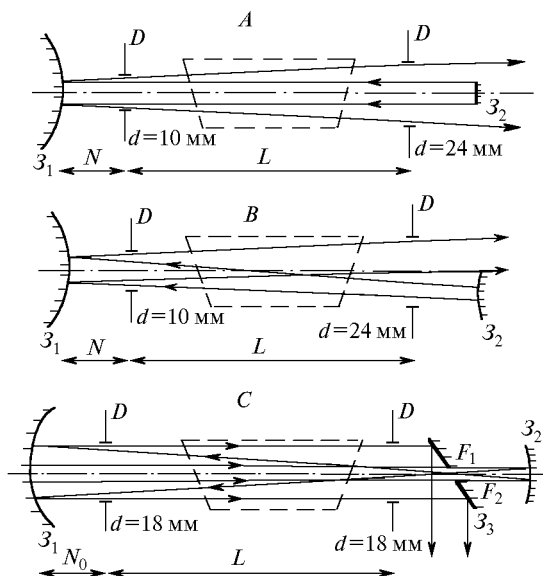


Рис. 1. Оптические схемы различных конфигураций неустойчивого резонатора. *A* – резонатор с плоским передним зеркалом; *B* – резонатор с двумя выпуклыми зеркалами и несимметричным выводом излучения; *C* – самофильтрующий неустойчивый резонатор; *D* – ограничивающие диафрагмы; Z_1, Z_2, Z_3 – зеркала полного отражения; F_1, F_2 – точки фокусов зеркал Z_1, Z_2 ; $L = 1610$ мм; $N = 160$ мм; $N_0 = 70$ мм

Для измерения энергии и мощности излучения использовались калориметры ИКТ-1Н и ИМО-2Н. Фокусировка в дальней зоне излучения лазера с резонаторами *A* и *B* осуществлялась телескопической системой, для этой же цели при установке резонатора *C* использовали линзу с фокусным расстоянием $F = 580$ см.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При использовании неустойчивых резонаторов, показанных на рис. 1, и энергоскладе $0,1$ Дж/см³ были получены следующие энергии генерации: 190 (*A*), 160 (*B*), 90 (*C*) мДж. При этом излучение всех трех резонаторов было многомодовым, а расходимость излучения для неустойчивых резонаторов *A* и *B* составляла $\sim 10^{-3}$ рад.

Причина появления дополнительных мод заключалась в том, что реальный лазерный резонатор, строго говоря, был не открытым, а объемным, и в формировании излучения в резонаторе, помимо торцевых зеркал, участвовали и поверхности электродов, образующие боковые стенки объемного резонатора. Многократно отраженное излучение от поверхностей электродов и зеркал приводило к образованию паразитных поперечных мод.

Для устранения влияния электродов на модовый состав излучения резонаторов были использованы диафрагмы с переменной апертурой. Уменьшая диаметры диафрагм до размеров, указанных на рис. 1, удалось устранить дополнительные моды. Однако при этом существенно уменьшился объем активной среды, участвующей в генерации, а следовательно, и

энергия излучения, которая в этом случае составляла половину от полной энергии, излучаемой без диафрагм. Для измерения распределения интенсивности в пучке использовался автокалибровочный метод [9]. Результаты измерений для трех типов неустойчивых резонаторов приведены на рис. 2.

Расходимости, определенные на уровне 0,83 от полной энергии излучения, для резонаторов *A, B, C* составили соответственно $2,5 \cdot 10^{-4}$, $1,9 \cdot 10^{-4}$, $1,4 \cdot 10^{-4}$ рад при дифракционных расходимостях $5,8 \cdot 10^{-5}$, $5,4 \cdot 10^{-5}$, $1,2 \cdot 10^{-4}$ рад. Измерение расходимости проводилось для всех резонаторов при энергии ~ 40 мДж. Наименьшая расходимость получена при использовании самофильтрующего неустойчивого резонатора *C*. Поэтому влияние поверхностей электродов на формирование излучения в данном случае было минимальное. Тем не менее без использования диафрагм расходимость пучка составила $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ рад.

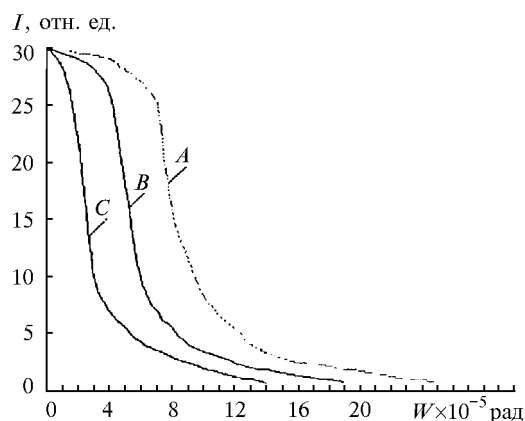


Рис. 2. Диаграмма направленности излучения для различных конфигураций неустойчивого резонатора. *A* – резонатор с плоским передним зеркалом; *B* – резонатор с двумя выпуклыми зеркалами и несимметричным выводом излучения; *C* – самофильтрующий неустойчивый резонатор

Таким образом, без использования угловых фильтров и ограничений апертуры луча диафрагмами независимо от типа выбранного резонатора не удается получить одномодовое излучение.

В результате действия импульса разряда газовая смесь в межэлектродном промежутке нагревается. Вкладываемая мощность за один импульс при этом достигает нескольких МВт/см³. При этом неизбежно возникают неоднородности по температуре в газовой смеси, которые сохраняются до 15 мин без прокачки активной среды, как это показано в работе [8]. Это, в свою очередь, приводит к оптической неоднородности среды внутри резонатора и к увеличению расходимости излучения. Представляет интерес, насколько эта ситуация улучшается при прокачке газовой смеси через промежуток. Эти данные приведены в табл. 1, из которой видно, что чем быстрее обновляется газ в межэлектродном промежутке, тем меньше предыдущий импульс разряда влияет на расходимость излучения следующего импульса. Экспери-

мент проводился при частоте следования импульсов 1 Гц, энерговкладе 0,1 Дж/см³ и длительности импульса тока 60 нс по основанию. Улучшение расходимости излучения при увеличении скорости прокатки от нуля до 18 м/с составило 8%.

Таблица 1

Зависимость расходимости лазерного излучения от скорости прокатки газовой смеси, $d_{\text{лиф}} = 2$ мм

Скорость прокатки, м/с	0	3	6	9	12	15	18
Расходимость, $W \times 10^{-5}$ рад	19,3	19,1	18,85	18,6	18,4	18,15	17,9

Рассуждая аналогичным образом [8], можно ожидать ухудшения расходимости излучения по мере роста скорости прокатки газовой смеси через промежуток $V=18$ м/с. Зависимость расходимости излучения от частоты следования импульсов приведена на рис. 3.

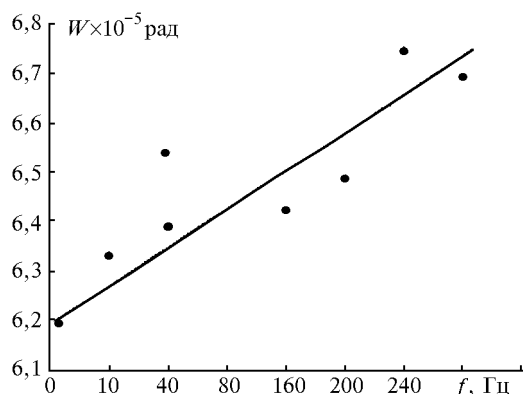


Рис. 3. Зависимость расходимости излучения ХеСl-лазера от частоты следования импульсов

Видно, что при возрастании частоты следования импульсов до 300 Гц расходимость излучения увеличивается на 7%.

Измерялся также диаметр пятна, сформированного разными типами резонаторов. Для этой цели использовались неисправленные на сферическую aberrацию кварцевые линзы с фокусными расстояниями $F = 60, 100, 150$ мм и корригированные линзы с $F = 60, 150$ мм.

В табл. 2 приведены результаты измерений диаметра пятна излучения при использовании неустойчивого резонатора с несимметричным выводом излучения (резонатор В, см. рис. 1).

Таблица 2

Диаметр пятна, мкм (расходимость $W = 1,9 \cdot 10^{-4}$ рад)

Условия	F , мм		
	60	100	150
Без исправления на сферическую aberrацию (эксперимент)	60	100	150
Размер, обусловленный сферической aberrацией (теория)	76	30	12
Корригированная линза (эксперимент)	20	—	30
Размер, обусловленный расходимостью (теория)	11	19	28

Минимальную величину пятна, равную 20 мкм, удалось получить при использовании корригированной линзы с фокусным расстоянием $F = 60$ мм. Для расчета влияния сферической aberrации на расходимость излучения была использована следующая формула [10]:

$$d = \frac{1}{n^4(1 - r_1/r_2)^3(1/n - 1)^2} \frac{D^3}{32F^2}.$$

В процессе исследований свойств резонатора вблизи фокальной перетяжки было обнаружено, что форма пятна излучения при прохождении фокусной точки не остается постоянной, а меняется от прямоугольной формы до круглой. На рис. 4,а представлены фотографии пятен на подложке. Изменение размеров и формы пятна показано схематически на рис. 4,б.

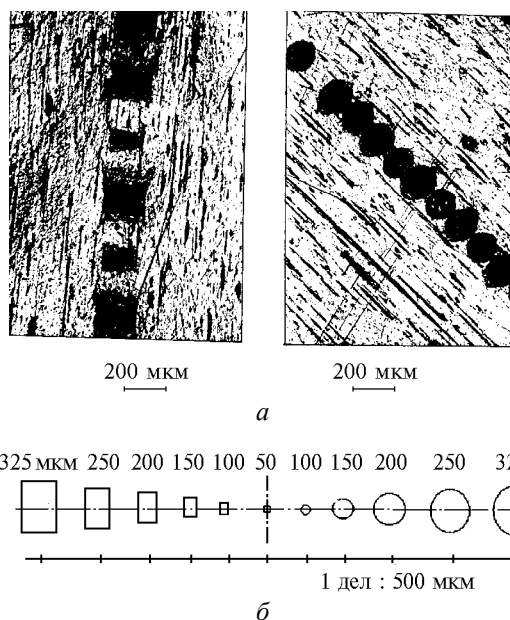


Рис. 4. Изменение формы пятен после фокусировки: а – фотографии пятен, сделанные с подложки; б – схематическое изменение формы пятна

Энергия импульса излучения в ходе данного эксперимента составляла 10–50 мДж, а длительность импульса излучения на полувысоте – 25–30 нс, расходимость $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ рад. Оптический пробой в фокальной плоскости не происходил. При больших расходимостях изменения формы пятна не наблюдалось. С точки зрения волновой теории и геометрической оптики вблизи фокуса распределение интенсивности в меридиальной плоскости должно быть симметричным [11]. На наш взгляд, такое поведение формы пятна связано с наличием в нем до фокальной перетяжки большой доли излучения низшего качества (высшие моды резонатора, переотраженное и усиленное излучение) и малой его долей в пятне после фокальной перетяжки.

Проведенные исследования позволили сделать следующие основные выводы:

1. Формирование одномодового излучения в импульсно-периодическом ХеСl-лазере невозможно без использования угловых фильтров и без ограничения апертуры луча диафрагмами независимо от типа выбранного оптического резонатора.

2. Минимальная расходимость $W = 1,4 \cdot 10^{-4}$ рад получена при использовании самофильтрующего неустойчивого резонатора.

3. Показано, что при типичных экспериментальных условиях влияние скорости прокачки газа и частоты следования импульсов сравнительно мало и составляет около 10%.

1. *Boffa V., Lazzaro P.Di., Gallerano L.P.* // IEEE. 1987. QE. V. 23. N 8. P. 1241–1244.

2. *James D., Terrence J.McKee., and Walter S.* // IEEE. 1979. QE. V. 15. N 5. P. 335–336.

3. *Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Повышение яркости излучения ХеСl-лазера с апертурой 20 см. Томск, 1994. 13 с. (Препринт/Институт сильноточной электроники СО РАН, № 2).

4. *Иванченко А.И., Крашенинников В.В., Смирнов А.А., Шульцман В.Б.* // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. N 7. С. 634–646.

5. *Ананьев Ю.А.* Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990. 264 с.

6. *Gobbi P.G.* // Opt. commun. 1984. V. 52. N 3. P. 195–198.

7. *Siegman A.E.* // Appl. optics. 1974. V. 13. N 2. P. 353–367.

8. *Londono C., Smith M.J., Daniev W.* // IEEE. 1987. QE. V. 24. N 12. P. 2467–2475.

9. *Avironis P.V., Doss T.T., Heimlich R.* // Rev. Sc. Inst. 1967. V. 38. N 3. P. 331–334.

10. *Григорянц А.Г.* Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.

11. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 719 с.

Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург
Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
9 октября 1997 г.

V.V. Osipov, A.N. Orlov, K.V. Bayanov, V.F. Losev. **Formation of Single Mode of Pulse-periodic XeCl-laser Radiation and Decrease of its Divergence.**

Beam divergence of excimer XeCl-laser is investigated. Far-field measured propagation diagrams for different resonator configurations are presented. Gas mixture velocity and pulse frequency influence on XeCl-laser beam divergence is also examined.