

Импульсно-периодический DF-лазер с мощностью генерации 400 Вт

Ю.Н.Аксенов, В.П.Борисов, Вал.В.Бурцев, С.Д.Великанов, С.Л.Воронов, В.В.Воронин,
А.Ф.Запольский, Г.А.Кириллов, О.И.Коваленко, В.И.Лазаренко, В.М.Мисько, В.М.Муругов,
В.Д.Селемир, С.Н.Синьков, Ю.Н.Фролов, В.П.Цибереv, Ю.Н.Шереметьев

Приведены результаты исследований импульсно-периодического трехмодульного электроразрядного DF-лазера на смеси SF₆-D₂. Показано, что оптимизация параметров генерации лазера по добротности резонатора, давлению и составу смеси позволяет получить среднюю мощность генерации 400 Вт при частоте следования импульсов ~ 10 Гц.

Ключевые слова: импульсно-периодический режим, электроразрядный лазер, DF-лазер.

1. Введение

Основная задача лазерного экологического мониторинга атмосферы – определение концентрации газов и различного типа аэрозолей на значительном удалении от источника излучения. Одной из наиболее интересных с точки зрения наличия полос поглощения загрязняющих веществ является область спектра 3–5 мкм. В связи с этим перспективным источником излучения для лидаров служат импульсно-периодические DF-лазеры ($\lambda = 3.5 - 4.0$ мкм), работающие на основе нецепной реакции фтора с дейтерием с замкнутым циклом смены рабочей смеси.

Применение таких лазеров обеспечивает получение в лидарных системах следующих метрологических и эксплуатационных преимуществ:

- возможность работы лазера в импульсно-периодическом режиме, что позволяет оперативно определять локализацию газовых и аэрозольных примесей при сканировании лазерного луча в пространстве;
- стабильность выходных параметров генерации, надежность и экологическая безопасность эксплуатации лазера вследствие абсолютной химической устойчивости рабочих смесей и замкнутого цикла их смены.

Спектр излучения DF-лазера состоит из нескольких десятков линий. Относительная доля энергии излучения в отдельных линиях спектра составляет от ~1% до ~10% [2].

Возможность использования такого лазера для дистанционного анализа газовых примесей в атмосфере продемонстрирована в работах [3–6]. В [4] показано, что с помощью DF-лазера можно надежно измерять в атмосфере концентрацию газовых примесей углеводородов, HCl, N₂O, SO₂. Из расчетов лидарного сигнала следует, что при энергии зондирующего излучения ~1 Дж, площади приемного телескопа ~1 м², чувствительности детектора ~5·10⁻¹⁰ Вт·Гц^{-1/2}·см⁻¹ отношение сигнал/шум может достигать 100 при расстоянии до аэрозольного

или газового облака несколько километров. Для получения энергии излучения в отдельной линии ~1 Дж энергия лазера во всем спектре излучения должна составлять десятки джоулей.

В настоящей статье рассматривается возможность получения энергии излучения DF-лазера порядка нескольких десятков джоулей в импульсно-периодическом режиме.

2. Экспериментальная установка

В работе [7] нами были приведены результаты исследований электроразрядного DF-лазера, работающего в режиме одиночных импульсов. Было показано, что энергия излучения в этом лазере достигает ~10 Дж при оптимальном составе рабочей смеси, ее давлении и коэффициенте отражения выходного зеркала резонатора. Одним из способов увеличения энергии лазера является использование нескольких однотипных электроразрядных лазерных модулей, установленных на одной оптической оси [8].

Питание разряда в этих модулях обеспечивается секционированным источником накачки, объединенным общей системой синхронизации. В настоящей работе мы использовали три лазерных модуля с идентичными системами формирования разряда, описанными в [7]. Система синхронизации осуществляла подачу напряжения на электроды системы формирования разряда с разбросом ± 20 нс и, следовательно, обеспечивала одновременное формирование объемного разряда во всех лазерных модулях.

Смена рабочей среды (SF₆-D₂) в разрядном объеме обеспечивалась за счет циркуляции газа в замкнутом контуре с помощью вентиляторов [1]. При этом газовый поток проходил сквозь электроды (вектор скорости потока направлен перпендикулярно плоскости электродов). Скорость газового потока в разрядном объеме составляла ~3–4 м/с.

На рис.1 приведена оптическая схема экспериментов. Оптический резонатор лазера состоял из плоского глухого зеркала 3 с коэффициентом отражения ~99% и плоского выходного зеркала 4 с коэффициентами отражения в различных опытах от 5.6 до 36%. Окна 2 рабочей камеры лазера 1 юстировались параллельно зеркалам

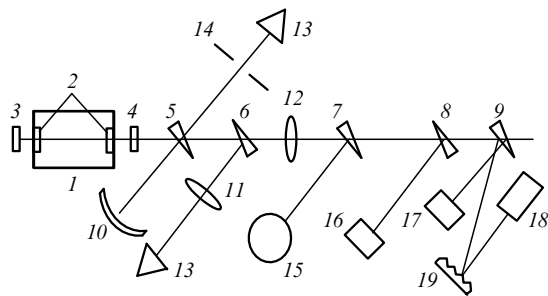


Рис.1. Оптическая схема экспериментов:
 1 – DF-лазер; 2 – окна рабочей камеры; 3 – плоское глухое зеркало с коэффициентом отражения ~99%; 4 – плоское выходное зеркало; 5–9 – клиновидные светоделительные пластины; 10 – сферическое зеркало ($F = 1000$ мм); 11 – линза из CaF_2 ($F = 670$ мм); 12 – линза из CaF_2 ($F = 1000$ мм); 13 – калориметр типа ТПИ-Э; 14 – диафрагма; 15 – вращающийся барабан; 16 – регистратор ближней зоны излучения; 17 – регистратор формы импульса; 18 – радиометр (RjP-735); 19 – диффузно отражающий экран из алюминия.

резонатора. Сферическое зеркало 10 с фокусным расстоянием $F = 1000$ мм и линза 11 с $F = 670$ мм фокусировали лазерное излучение на калориметры 13 типа ТПИ-Э. Линза 12 с $F = 1000$ мм обеспечивала фокусировку излучения на ряд регистраторов: вращающийся барабан 15, позволяющий фиксировать на термоэкрane изображения ближней зоны (БЗ) излучения лазера; регистратор БЗ излучения лазера 16 с применением термофотоплёнки [9]; регистратор формы импульса генерации 17 (полупроводниковая камера ионизационного типа [10]); радиометр 18 (RjP-735) для регистрации энергии излучения в каждом импульсе.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

На первом этапе экспериментов исследовались характеристики лазера, работающего в режиме одиночных импульсов. Эксперименты проводились с рабочей смесью состава $\text{SF}_6:\text{D}_2 = 10:1$ при вариации общего давления p от 0.08 до 0.12 ат. На рис.2 и 3 приведены зави-

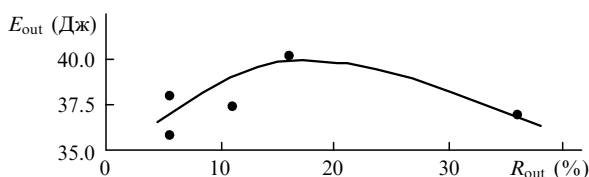


Рис.2. Зависимость лазерной энергии E_{out} от коэффициента отражения выходного зеркала резонатора R_{out} при давлении рабочей смеси $p = 0.10$ ат.

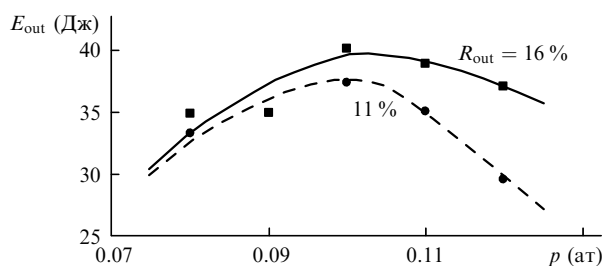


Рис.3. Зависимости лазерной энергии E_{out} от давления смеси p при разных коэффициентах отражения выходного зеркала резонатора R_{out} .

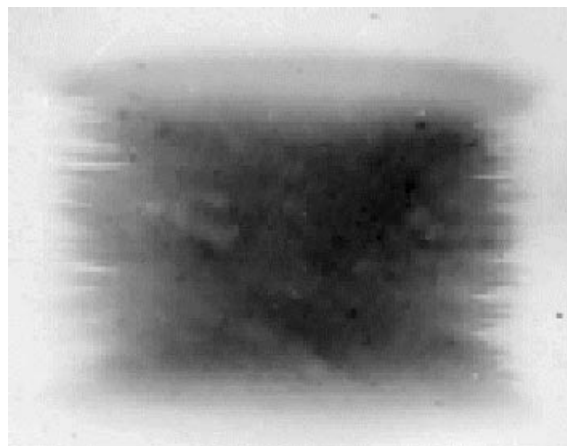


Рис.4. Ближняя зона лазерного излучения.

симости лазерной энергии генерации E_{out} от коэффициента отражения выходного зеркала резонатора R_{out} при $p = 0.10$ ат и от давления рабочей смеси при разных R_{out} . Максимальная энергия генерации ~40 Дж была достигнута при $R_{out} = 16\%$ и $p = 0.10$ ат.

Анализ полученных результатов показывает, что по сравнению с лазерной установкой, описанной в [7], увеличение в три раза длины активной среды в исследуемом лазере привело к изменению оптимального коэффициента отражения выходного зеркала резонатора от ~36 до ~16% и к росту энергии генерации (в пересчете на один лазерный модуль) от ~10.5 до ~13.3 Дж. Полученные результаты адекватно объясняются увеличением длины активной среды и вложенной удельной электрической энергии. Технический КПД лазера в оптимальных условиях его работы $\eta_t = E_{out}/E_0 \approx 2.3\%$ (где E_0 – запасенная электрическая энергия), что хорошо согласуется со значением, зарегистрированным в работе [7].

В ряде опытов была проведена регистрация излучения лазера в БЗ с применением термофотоплёнки. Пространственное разрешение схемы было оценено как 0.5 лин./мм в предметной плоскости. Изображение БЗ, полученное в одном из опытов, и результаты его обработки представлены на рис.4 и 5.

Предварительный анализ результатов обработки изображения БЗ показал, что излучение в БЗ имеет практически прямоугольную форму с размерами 120 мм по горизонтали (зазор между электродами) и ~100 мм по

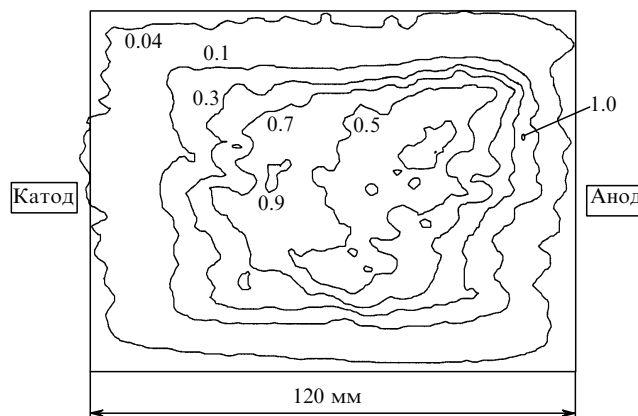


Рис.5. Изоурвни относительных плотностей лазерной энергии в БЗ.

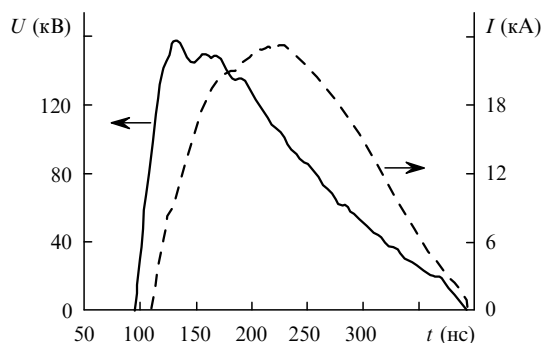


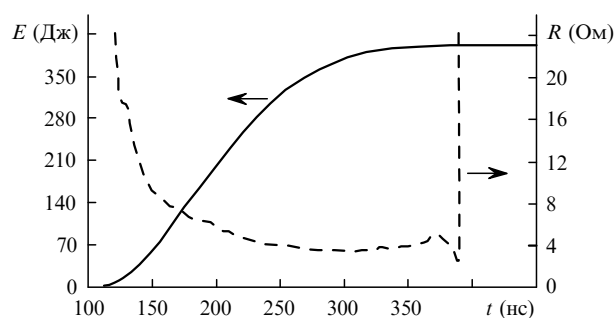
Рис.6. Осциллограммы напряжения на электродах и тока разряда.

вертикали. Отсюда следует, что активный объем лазера $V_a = 10.8$ л, а средний удельный энергосъем $\varepsilon \approx 3.7$ Дж/л. При этом хорошо прослеживается резкий спад плотности энергии генерации в областях шириной порядка 10–14 мм на всех краях активного объема. По оценкам, эти края занимают примерно 37 % объема активной среды, т. е. 4 л, а средний удельный энергосъем в них составляет всего лишь ~ 0.7 Дж/л. Область генерации в сечении имеет вид прямоугольника со сторонами ~ 94 мм по горизонтали и ~ 78 мм по вертикали. Ее объем составляет примерно 63 % объема активной среды, т. е. 6.8 л. В этой области $\varepsilon \approx 5.5$ Дж/л при максимальных локальных энергосъемах ε_{\max} , достигающих до ~ 11 Дж/л. Наличие приэлектродных областей, энергия излучения из которых невысока (особенно у катода), может быть объяснено частичным затенением лазерного излучения плазмой незавершенных стриммеров и сильными неоднородностями энерговклада.

В процессе экспериментов измерялись параметры электрического разряда в рабочей камере. На рис.6 приведены типичные осциллограммы напряжения на электродах и тока разряда при запасенной электрической энергии $E_0 \approx 1700$ Дж, давлении рабочей смеси $p = 0.10$ ат и ее составе $SF_6 : D_2 = 10 : 1$.

Из рис.6 видно, что при работе установки напряжение на каждом из электродов относительно земли достигает примерно ± 160 кВ, а ток разряда доходит до значения ~ 23 кА (в одном модуле лазера). Расчетные зависимости (полученные на основе экспериментально зарегистрированных осциллограмм импульсов напряжения и тока) вложенной электрической энергии и сопротивления разряда установки от времени приведены на рис.7. Из рис.6 и 7 следует, что длительность импульса инициирования (токовый импульс) $\tau \approx 270 \pm 30$ нс, а суммарная электрическая энергия, вкладываемая в разряд в трех модулях, равна ~ 1200 Дж, что составляет ~ 70 % от энергии, запасенной в источнике накачки.

На втором этапе экспериментов исследовался импульсно-периодический режим лазера. Типичная длительность работы лазера составляла примерно 0.8–1.3 с при частоте следования импульсов генерации $f \sim 10$ Гц

Рис.7. Вложенная электрическая энергия E и сопротивление разряда R для одного модуля.

(при числе импульсов в сериях от 10 до 13). В этих исследованиях регистрировались суммарная энергия лазерных импульсов в серии калориметрами типа ТПИ-Э и энергия каждого импульса генерации в серии с помощью радиометра RjP-735 с выводом данных на компьютер.

Средняя энергия генерации в импульсах в разных сериях $\bar{E}_{out} \approx 34 - 35$ Дж при среднеквадратичном отклонении $\delta \approx 0.3 - 1$ Дж. Средняя мощность излучения исследуемого лазера составила ~ 400 Вт.

Оценки технического КПД лазера, работающего в импульсно-периодическом режиме, дают $\eta_l \approx 2 - 2.1$ %, что составляет примерно 0.9 технического КПД, зарегистрированного при работе лазера в импульсном режиме, и обусловлено, по-видимому, увеличением вероятности стриммирования разряда.

Таким образом, экспериментально исследованный в настоящей работе импульсно-периодический DF-лазер может использоваться для мониторинга атмосферы.

1. Великанов С.Д., Запольский А.Ф., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 11 (1997).
2. Spencer D.J., Denault G.C., Takimoto H.N. *Appl.Optics*, **13**, 2855 (1974).
3. Murray E.R., van der Laan J.E., Hawley J.G. *Appl.Optics*, **15**, 3140 (1976).
4. Великанов С.Д., Елутин А.С., Кудряшов Е.А., Пегоев И.Н., Синьков С.Н., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 279 (1997).
5. Великанов С.Д., Елутин А.С., Пегоев И.Н., Синьков С.Н., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 181 (1998).
6. O'Connor S.J., Walnsley H.L., Pasley J.G. *Proc.SPIE*, **3493**, 255 (1998).
7. Борисов В.П., Бурцев Вал.В., Великанов С.Д., Воронов С.Л., Воронин В.В., Запольский А.Ф., Золотов М.И., Кириллов Г.А., Мищенко Г.М., Подавалов А.М., Селемир В.Д., Урлин В.Д., Фролов Ю.Н., Циберев В.П. *Квантовая электроника*, **30**, 225 (2000).
8. Кудряшов В.П., Осипов В.В., Савин В.В. *Квантовая электроника*, **6**, 417 (1979).
9. Астров Ю.А., Егоров В.В., Муругов В.М., Шереметьев Ю.Н. *Квантовая электроника*, **4**, 1681 (1977).
10. Ковалев В.И., Лесив А.Р., Файзуллин Ф.С., Федоров Б.Ф. *ИТЭ*, **1**, 149 (1983).