

Исследование спектрально- временного распределения энергии генерации электроразрядного HF/DF-лазера

Детально изучены спектрально-временные параметры излучения электроразрядного HF/DF-лазера. Определена зависимость энергии и мощности лазерного импульса от времени. Зарегистрированы интегральный спектральный состав излучения и состав излучения в различные моменты лазерного импульса. Определена задержка начала излучения на разных переходах относительно начала лазерного импульса. Установлено, что длительность импульса излучения отдельной спектральной линии зависит в первую очередь от вращательного квантового числа и практически не зависит от колебательного квантового числа.

**Э. А. Деменкова, Н. А. Зарецкий,
О. О. Федоркин, В. В. Щуров**

Уникальный спектр излучения HF/DF-лазера, состоящий из нескольких десятков отдельных спектральных линий, позволяет рассматривать такой лазер для мониторинга атмосферы. Эффективным методом измерения концентрации углеводородов в воздухе является бесконтактный метод дифференциального поглощения с использованием лазерного источника.

Для дальнейшего совершенствования методов применения химических лазеров в области мониторинга атмосферы важно иметь полное представление о богатом спектральном составе излучения HF/DF-лазера, в том числе изучить распределение во времени отдельных спектральных линий HF/DF-лазера.

Изучение спектрального состава излучения электроразрядного химического лазера с неустойчивым резонатором (коэффициент увеличения телескопа $M = 2,5$) проводилось по схеме, представленной на рис. 1 [1].

Типичные интегральные импульсы мощности излучения HF- и DF-лазеров и распределение энергии импульсов во времени показаны на рис. 2.

Видно, что при общей длительности лазерного импульса порядка 500 нс (по уровню 0,1 интенсивности) 80 % энергии выделяется за время порядка 300 нс.

В целом форма лазерных импульсов практически идентична. Длительность импульсов по уровню 0,1 максимальной амплитуды составляет для HF-лазера $t_{0,1}^{HF} \approx 480$ нс, для DF-лазера $t_{0,1}^{DF} \approx 460$ нс, но по полувысоте импульс излучения HF-лазера длиннее примерно на 50 нс.

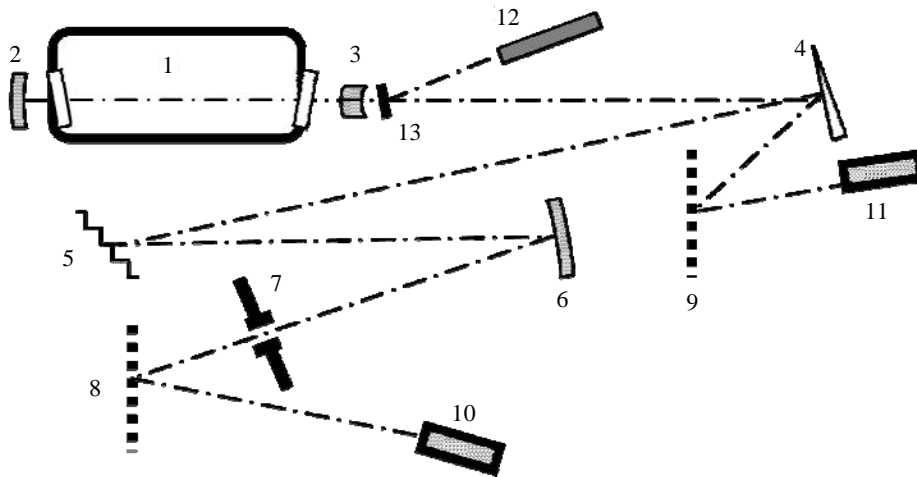


Рис. 1. Схема измерений спектрального состава излучения: 1 – лазер; 2, 3 – зеркала резонатора; 4 – клин из CaF₂; 5 – реплика дифракционной решетки 100 штр./мм; 6 – зеркало сферическое; 7 – щелевая диафрагма шириной 3 мм; 8, 9 – диффузно-рассеивающие экраны; 10, 11 – измерители формы лазерного импульса; 12 – юстировочный лазер, $\lambda = 0,527$ мкм; 13 – поворотное зеркало

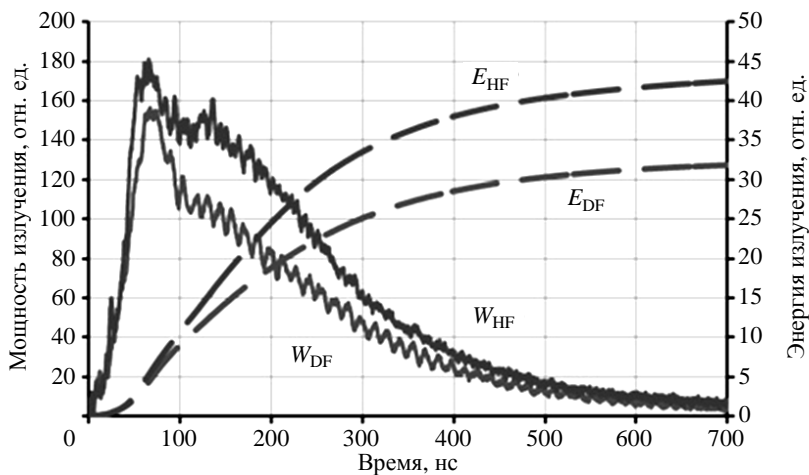


Рис. 2. Распределение мощности и энергии импульса лазера во времени

Мощность импульса рассчитывалась по формуле [2]

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{N}. \quad (1)$$

Для HF-лазера $W_{HF} \approx 83$ отн. ед., для DF-лазера $W_{DF} \approx 64$ отн. ед. Пиковые мощности в отдельные моменты времени гораздо выше.

Измерение распределения энергии по длинам волн проведено по схеме рис. 1.

Вначале была проведена идентификация спектральных линий. Типичные регистрограммы ожогов на экране, соответствующих отдельным спектральным линиям, представлены на рис. 3. Линиями отмечено положение порядков отражения дифракционной решетки. Отсюда определился масштаб, равный 3,05 нм/мм, что позволило идентифицировать спектральные линии.

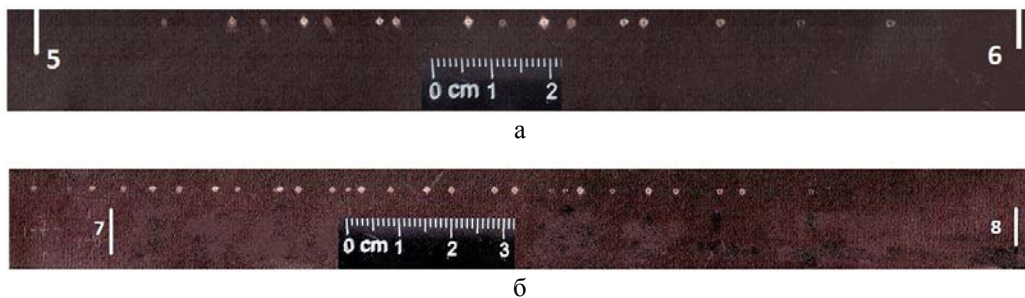


Рис. 3. Регистрограмма линий излучения на термоэкране: а – HF-лазер, б – DF-лазер

В спектре излучения HF-лазера экспериментально обнаружены 16 линий, в спектре излучения DF-лазера – 28 линий разной интенсивности в четырех колебательных полосах.

Далее измерялась энергия отдельных спектральных линий.

При обработке данных в экспериментах с HF-лазером наряду с ослаблением оптической схемы учитывалось поглощение линий парами воды, содержащимися в атмосфере. Данные по коэффициентам поглощения отдельных линий были взяты из базы данных Hitran.

Спектральный состав излучения HF- и DF-лазеров представлен на рис. 4.

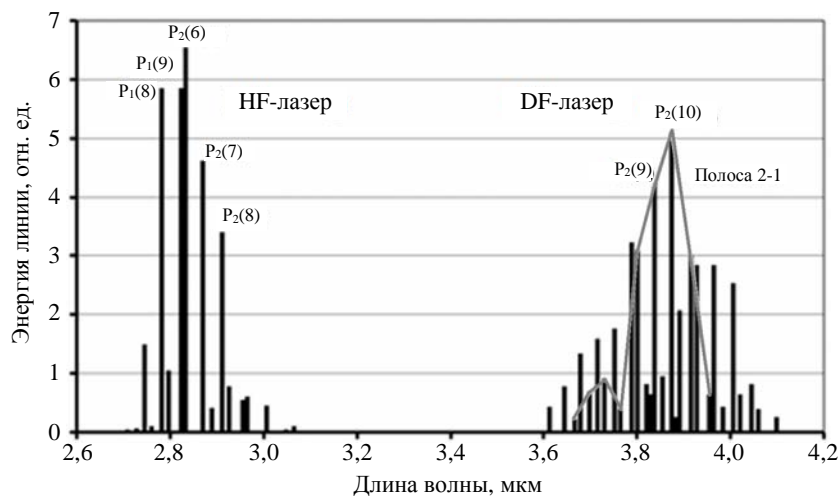


Рис. 4. Спектральный состав излучения HF- и DF-лазеров

Линии излучения DF-лазера лежат в спектральной области от 3,6 до 4,1 мкм. Наиболее энергетичной является полоса 2–1, в ней сосредоточено 42,6 % всей лазерной энергии. В этой же полосе находятся и наиболее сильные линии излучения P₂(9) и P₂(10), на них приходится свыше 20 % энергии. Линии излучения HF-лазера лежат в спектральной области от 2,6 до 3,1 мкм. Основная энергия генерации (≈82 %) сосредоточена в пяти линиях P₁(8), P₁(9), P₂(6), P₂(7), P₂(8), находящихся в спектральном диапазоне от 2,78 до 2,91 мкм [3]. По данным исследований можно построить график распределения энергии по спектральным областям (рис. 5).

С помощью измерителя зарегистрированы формы лазерных импульсов на всех колебательно-вращательных переходах HF- и DF-лазеров.

Сигнал напряжения с датчика записывался на осциллограф TDS и оцифровывался. Так как энергия линии есть интеграл от мощности по времени, то несложно перевести значения напряжения в мощность, зная энергию линии.

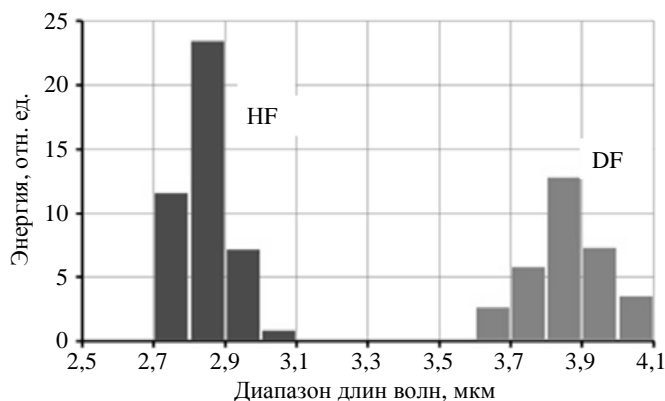


Рис. 5. Распределение энергии HF- и DF-лазеров по спектральным областям

Некоторые импульсы имеют по два и даже три максимума. Это связано с тем, что в щелевую диафрагму помимо излучения измеряемой линии попадает часть излучения от других близко расположенных линий. Например, линии $P_1(12)$, $P_2(9)$ и $P_3(5)$ находятся очень близко, длины их волн отличаются не более чем на 0,009 мкм, поэтому спектрально разделить их не удастся. Так как в щелевую диафрагму попадает спектральный интервал 0,009 мкм, то ясно, что «крылья» соседних линий могут фиксироваться на осциллограмме.

Отметим, что одновременно с формой импульса на отдельном переходе другим приемником регистрировался общий импульс излучения лазера. Это позволило определить задержку каждой спектральной линии относительно общего импульса. На рис. 6 приведено время задержки генерации на переходах для разных колебательных полос и вращательных квантовых чисел. Точность определения временных параметров оценивается как ± 10 нс.

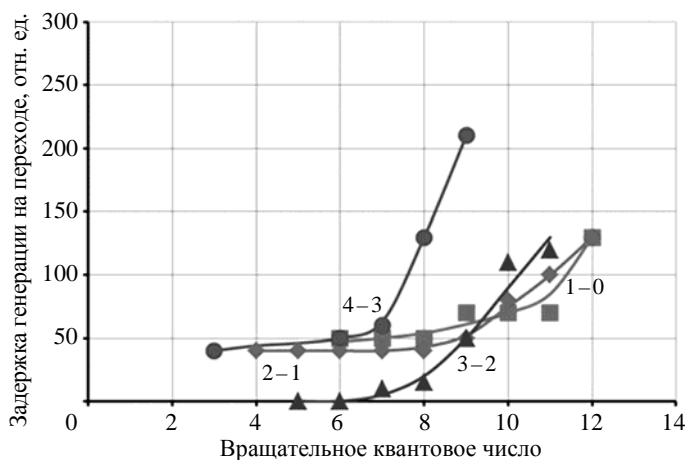


Рис. 6. Зависимость времени задержки генерации излучения на переходах для различных вращательных квантовых чисел j молекулы DF

Из рисунка видно, что генерация начинается на переходах полосы 3–2 при малых вращательных квантовых числах. С ростом вращательного квантового числа время задержки увеличивается. Такая картина характерна для всех колебательных полос.

Длительность импульсов генерации на разных колебательно-вращательных переходах приведена на рис. 7.

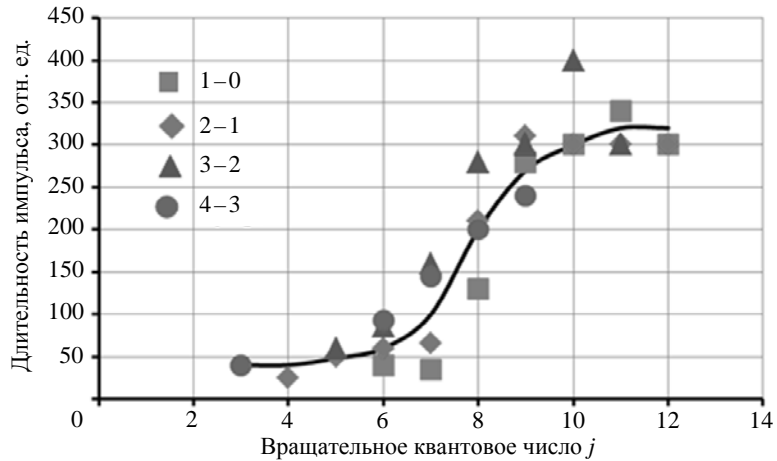


Рис. 7. Зависимость длительности импульса генерации по уровню 0,5 амплитуды для различных вращательных квантовых чисел j молекулы DF

Обращает на себя внимание тот факт, что длительность импульса генерации зависит лишь от вращательного квантового числа и практически не зависит от колебательного квантового числа. Знание временных параметров импульсов генерации на всех переходах позволило определить изменение спектра излучения DF-лазера в различные моменты времени. Мгновенные спектры излучения представлены на рис. 8. Видно, что наиболее богатый спектр наблюдается в начале лазерного импульса.

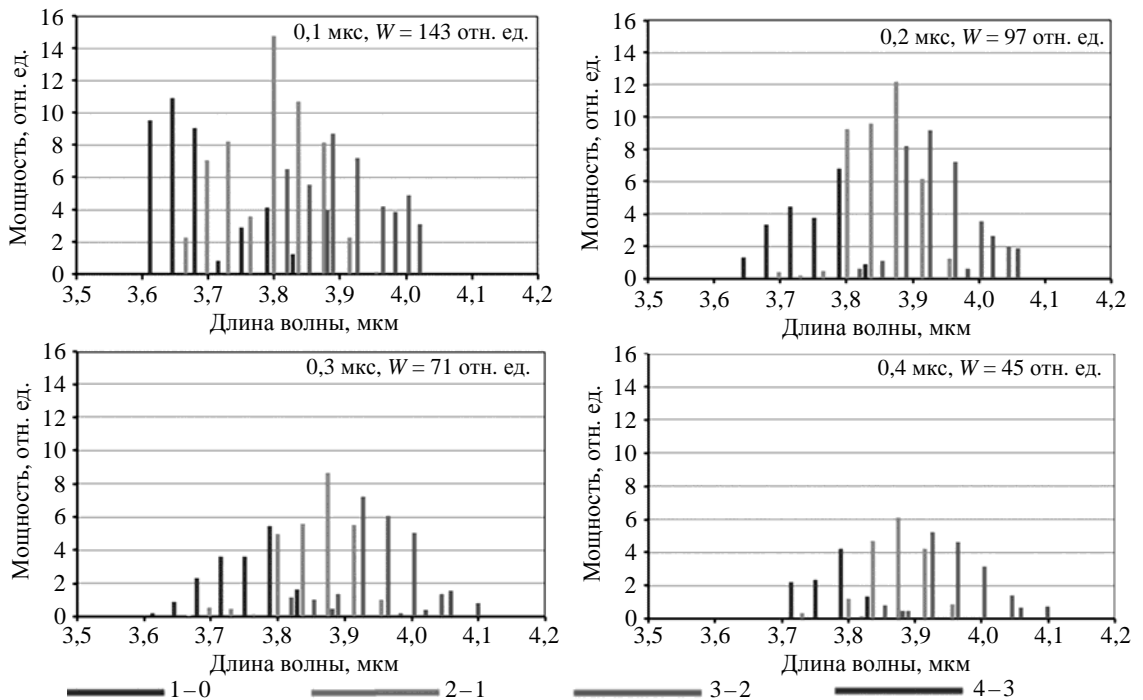


Рис. 8. Спектры DF-лазера в разные моменты времени относительно начала импульса генерации

Зависимость мощности спектральных линий от вращательного квантового числа в пределах отдельных колебательных полос приведена на рис. 9, цифры у линий – время в микросекундах.

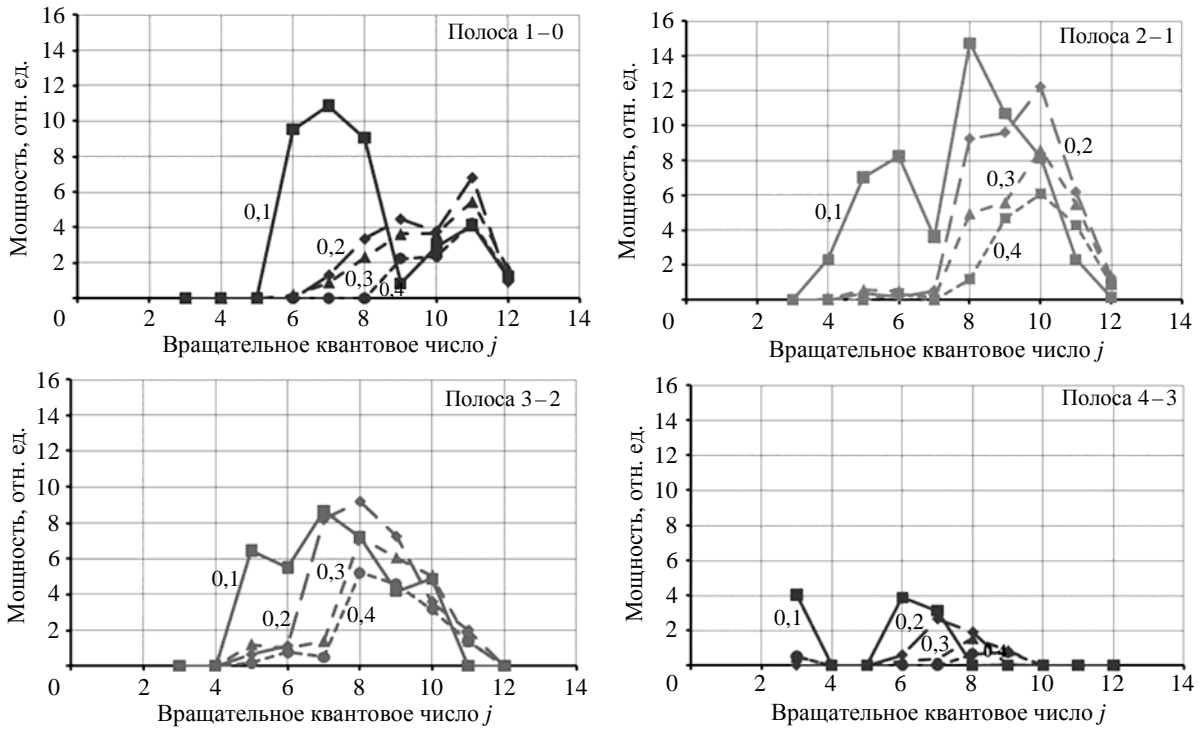


Рис. 9. Зависимость мощности спектральных линий DF-лазера от вращательного квантового числа в различные моменты времени

Если просуммировать мощность линий с одинаковым вращательным квантовым числом в различные моменты времени, то получим картину, представленную на рис. 10 (цифры у линий – время в микросекундах). Видно, что со временем максимум энерговыделения смещается в сторону больших значений j .

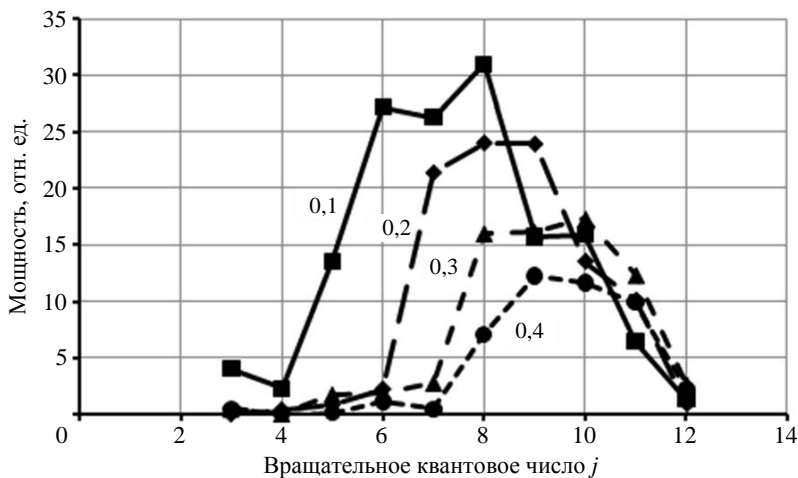


Рис. 10. Зависимость суммарной мощности линий с одинаковым j от вращательного квантового числа в различные моменты времени

На рис. 11, 12 приведены время задержки и длительность генерации на переходах для разных колебательных полос и вращательных квантовых чисел HF-лазера.

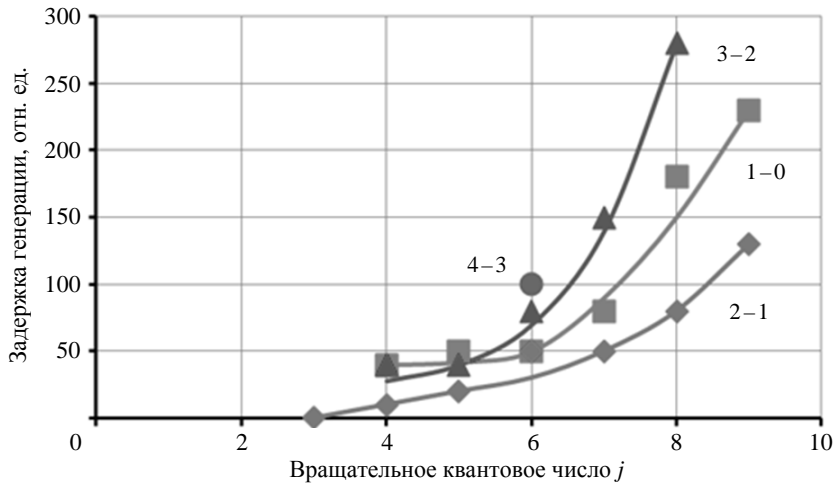


Рис. 11. Зависимость времени задержки генерации излучения на переходах HF-лазера от вращательного квантового числа j

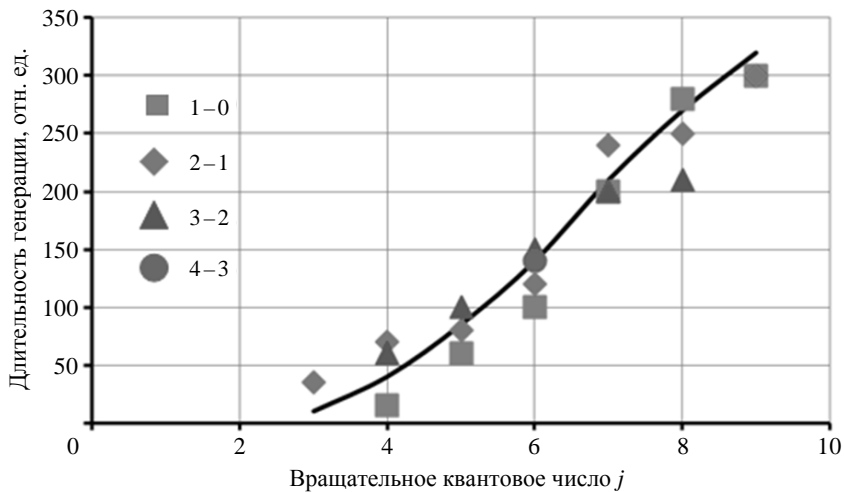


Рис. 12. Зависимость длительности генерации излучения по уровню 0,5 амплитуды на переходах HF-лазера от вращательного квантового числа j

Как и для DF-лазера, время задержки генерации растет с увеличением j , но генерация начинается на полосе 2–1. Длительность генерации определяется в основном вращательным квантовым числом и практически не зависит от колебательного квантового числа.

Мгновенный спектр излучения HF-лазера в различные моменты времени представлен на рис. 13.

Наиболее богатый спектр излучения приходится на 0,1 мкс после начала лазерного импульса.

Зависимость мощности спектральных линий от вращательного квантового числа в пределах отдельных колебательных полос представлена на рис. 14. Так как в полосе 4–3 находится лишь одна линия, то данные по ней не приводятся.

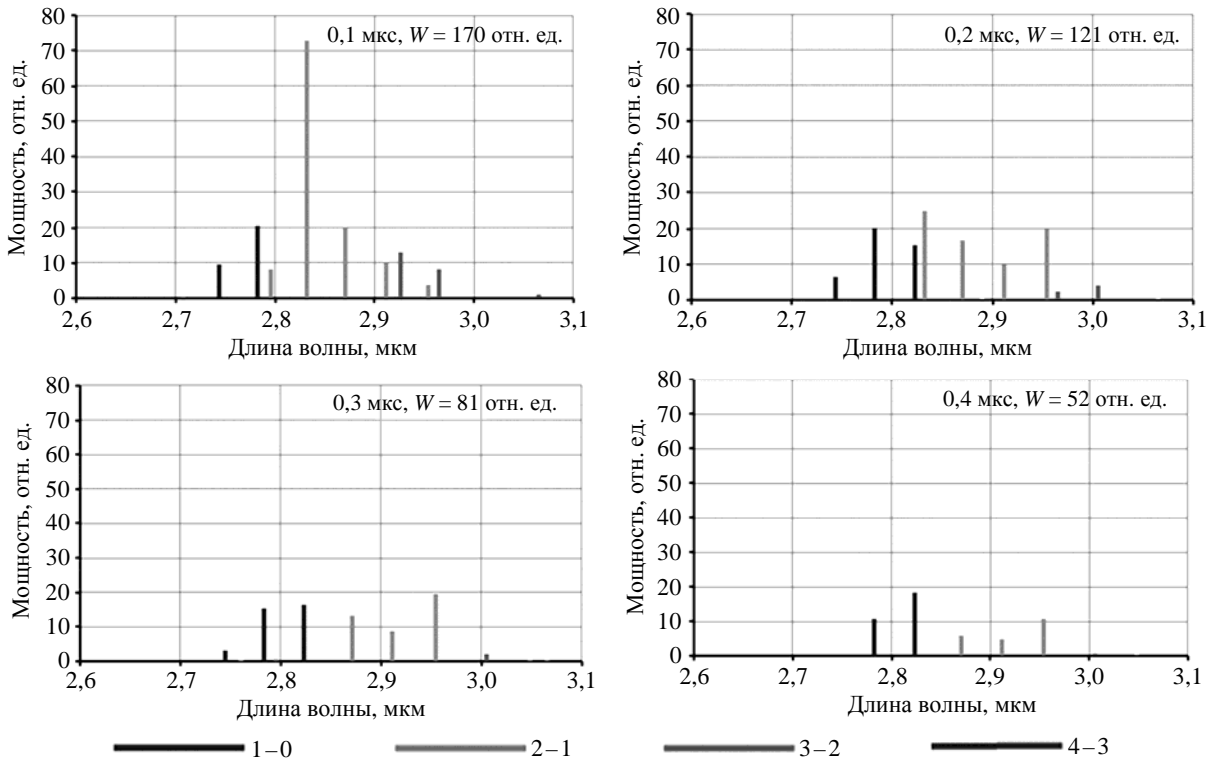


Рис. 13. Мгновенный спектр излучения HF-лазера в различные моменты времени

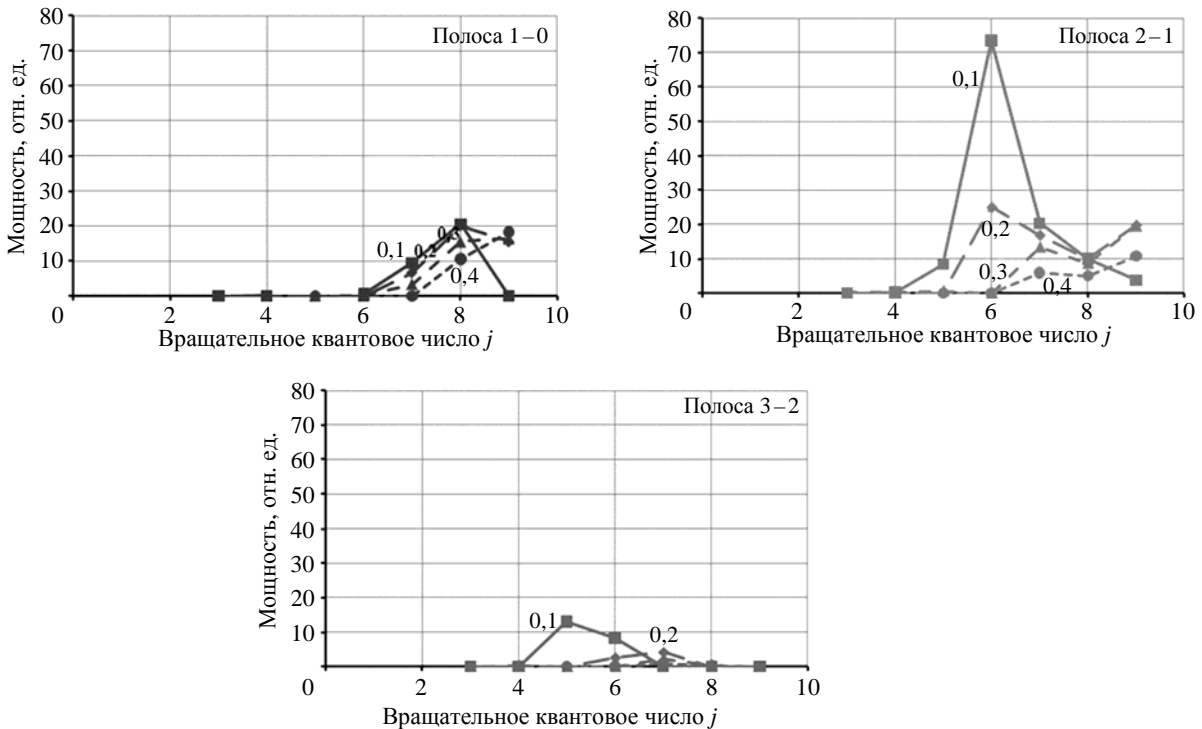


Рис. 14. Зависимость мощности спектральных линий HF-лазера от вращательного квантового числа j

Если в различные моменты времени просуммировать мощности линий с одинаковым вращательным квантовым числом, то получим картину, представленную на рис. 15. Видно, что со временем максимум в полосе сдвигается в сторону больших вращательных чисел.

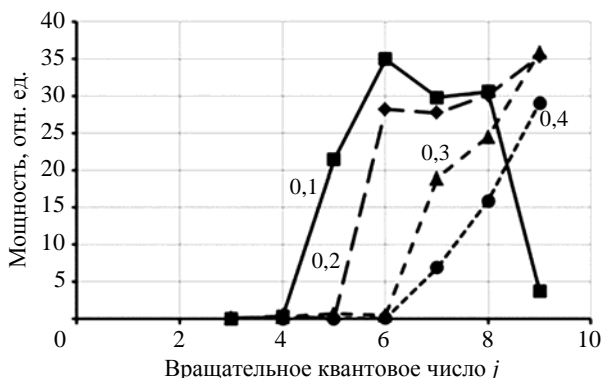


Рис. 15. Зависимость суммарной мощности линий с одинаковым j от вращательного квантового числа в различные моменты времени

На рис. 16 представлены интегральные формы импульсов HF- и DF-лазеров. Видно хорошее совпадение суммарных по всем линиям и экспериментальных форм импульсов.

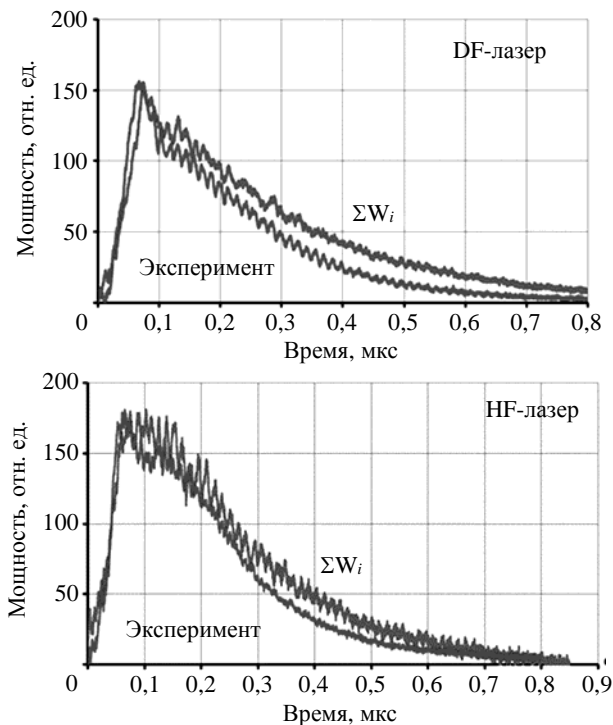


Рис. 16. Интегральные формы импульсов

Выводы

Детально изучены спектрально-временные параметры излучения электроразрядного HF/DF-лазера. Определена зависимость энергии и мощности лазерного импульса от времени. Показано, что в первые 0,3 мкс выделяется до 80 % общей энергии.

Зарегистрированы интегральный спектральный состав излучения и состав излучения в различные моменты лазерного импульса.

Определена задержка начала генерации на разных переходах относительно начала лазерного импульса. Показано, что для HF-лазера генерация начинается на переходах полосы 2–1 при малых вращательных квантовых числах j , для DF-лазера генерация начинается на переходах полосы 3–2. С ростом квантового числа j задержка увеличивается.

Длительность импульса излучения отдельной спектральной линии зависит в первую очередь от вращательного квантового числа и практически не зависит от колебательного квантового числа.

Список литературы

1. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. – М., 1979.
2. Степанов Б. Н. Методы расчета оптических квантовых генераторов. – Минск, 1966.
3. Гросс Р., Ботт Д. Химические лазеры. – М., 1980.

Research of Spectral Time Distribution of Generation Energy of an Electric-Discharge HF/DF-Laser

E. A. Demenkova, N. A. Zaretsky, O. O. Fedorkin, V. V. Shchurov

This paper provides thorough study of spectral time parameters of electric-discharge HF/DF-laser emission. The dependence of laser pulse energy and power on time has been obtained. Both integrated laser spectra and emission composition at different moments of a laser pulse have been registered. The delay of emission onset at different junctions with respect to the onset of a laser pulse has been obtained. Emission pulse width of a particular spectral line depends primarily on rotational quantum number and doesn't depend practically on vibrational quantum number.