

# Расчетно-экспериментальное исследование непрерывного химического HF/DF-лазера, работающего в режиме модуляции добротности резонатора

Б.С.Александров, В.И.Купренюк, Ю.П.Максимов, В.И.Машенджинов, А.Ю.Родионов, М.А.Ротинян, В.В.Судариков, Н.Е.Третьяков, И.А.Федоров, А.Л.Эцина

*Рассчитаны и экспериментально исследованы энергетические и временные характеристики излучения непрерывного химического среднеразмержного HF/DF-лазера с механической модуляцией добротности резонатора вращающимся зеркалом с частотой до 1 кГц. В условиях эксперимента пиковая мощность импульсов лазерного излучения импульсно-периодического режима не менее чем в четыре раза превысила мощность излучения непрерывного режима работы HF-лазера. Средняя мощность импульсно-периодического режима ниже, чем непрерывного, но она растет (примерно в два раза) с увеличением частоты модуляции. Определено время полного восстановления профиля коэффициента усиления активной среды, которое составляет 6–7 мкс. Разработаны две численные модели, описывающие динамику генерации излучения в режиме модуляции добротности резонатора как в HF-, так и в DF-лазере. С помощью этих моделей проанализированы некоторые особенности работы таких лазеров.*

**Ключевые слова:** химический лазер, модуляция добротности резонатора, импульсно-периодическая генерация излучения, пиковая мощность импульса.

## 1. Введение

Реализация импульсно-периодического режима (ИПР) работы лазерных излучателей с непрерывной накачкой методом модуляции добротности резонатора (МДР) позволяет, сохраняя все их достоинства, значительно (на порядок) повысить пиковую мощность излучения при сохранении (или незначительном снижении) средней мощности [1].

ИПР с высокой пиковой мощностью в импульсе имеет преимущества по сравнению с непрерывным режимом как при осуществлении технологических процессов (лазерное разделение изотопов, резка материалов, абляция), так и с точки зрения повышения эффективности нелинейных процессов (частотное преобразование излучения, обращение волнового фронта). В последнее время внимание исследователей привлекает идея использования светодетонационных волн для создания реактивной тяги [2–4]. Реализация этой идеи предполагает применение лазеров с большой частотой повторения коротких (менее 100 нс) и мощных импульсов излучения. В качестве излучателя для этой цели в [4, 5] предложен газодинамический CO<sub>2</sub>-лазер. Причем авторы [5] реализовали режим МДР в подобном лазере мощностью 10 кВт методом самоинжекции модулированного излучения в неустойчивый резонатор. Метод МДР для электроразрядного CO<sub>2</sub>-лазера

был осуществлен в работе [6], авторы которой использовали как электрооптический модулятор, так и механический затвор. Получена генерация излучения с частотами следования импульсов 10–40 кГц при длительности импульса 200–300 нс. В работе [7] расчетным путем показана возможность увеличения более чем на три порядка пиковой мощности излучения в режиме МДР электроионизационного СО-лазера с частотой следования импульсов 50 кГц при сохранении средней мощности (до 96 %). В работе [8] эффект Зеемана использовали для МДР в непрерывном кислород-иодном лазере. При частоте повторения импульсов магнитного поля  $\sim 2$  кГц превышение пиковой мощности  $P_{\text{peak}}$  над средней мощностью  $P_{\text{av}}$  составило  $k = P_{\text{peak}}/P_{\text{av}} = 16$ .

В работе [9] была предпринята попытка рассчитать характеристики сверхзвукового HF-лазера, работающего в режиме МДР. При определенных условиях для частот повторения импульсов 150–200 кГц прогнозировалось достижение коэффициента  $k = 30$  при падении средней мощности излучения вдвое. Также был поставлен эксперимент на малоразмерной (средняя мощность  $P \sim 1$  кВт) модели HF-лазера; его результаты приведены в [10]. Схема эксперимента не позволяла определять время восстановления инверсии в активной среде после гигантского импульса (в расчете это время принималось равным 4 мкс). Кроме того, недостатком эксперимента было то, что коэффициент заполнения резонатора активной средой составлял  $1/26$ , тогда как в расчете он был принят равным единице. Также схема МДР с использованием вращающегося зеркала жестко связывала время включения добротности резонатора и время существования резонатора с высокой добротностью. Все это не позволило согласовать экспериментальные и расчетные результаты.

С целью частичного устранения недостатков эксперимента [10] и для более глубокого понимания сущности

Б.С.Александров, Ю.П.Максимов, В.И.Машенджинов, М.А.Ротинян, В.В.Судариков, Н.Е.Третьяков, И.А.Федоров, А.Л.Эцина. ФГУП «Российский научный центр "Прикладная химия"», Россия, 197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14; e-mail: pulya@mail.ru, rotinian@rscac.spb.ru

В.И.Купренюк, А.Ю.Родионов. ФГУП «Научно-производственная корпорация "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова"» – Институт лазерной физики, Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая линия, 12

Поступила в редакцию 27 июля 2006 г., после доработки – 11 января 2007 г.

ИПР с механической модуляцией добротности резонатора выполнена новая серия исследований, в задачи которой входили экспериментальное и расчетно-теоретическое исследования ИПР более мощного (средняя мощность  $P \sim 8$  кВт, протяженность активной среды 400 мм) HF/DF-лазера, а также получение данных по времени восстановления инверсии в его активной среде.

## 2. Экспериментальная установка

Экспериментальная часть исследования ИПР проводилась на стендовой модели HF-лазера (генераторе излучения) с сопловым блоком, выполненным по схеме смещения реагентов сопло – сопло. Схема эксперимента показана на рис. 1. Генератор излучения с сопловым блоком 3 размещен в барокамере (камере низкого давления) 1, на двух противоположных стенках которой во фланцах установлены сферическое глухое зеркало 2 резонатора с алюминиевым покрытием на стеклянной подложке (радиус кривизны  $R = 10765$  мм, световой диаметр – 160 мм) и выводное окно 4 (плоскопараллельная пластина из флюорита). Два концевых плоских резонаторных зеркала 6 и 7 (стеклянные пластины с алюминиевым покрытием диаметром 40 мм) размещены на расстоянии  $L = 3890$  мм от глухого зеркала 2 резонатора. Оптическая ось резонаторов, образованных зеркалами 2, 6 и 7, проходила на расстоянии  $x = 12$  мм от среза соплового блока 3 генератора излучения. Вывод генерируемого излучения в измерительные каналы осуществлялся через выводное окно 4, которое наклонено на угол  $3^\circ$  по отношению к оси резонатора. Длина  $l$  активной среды вдоль оптической оси резонатора (определяемая размером соплового блока) составляла 400 мм, а протяженность среды вдоль направления течения потока – 40 мм.

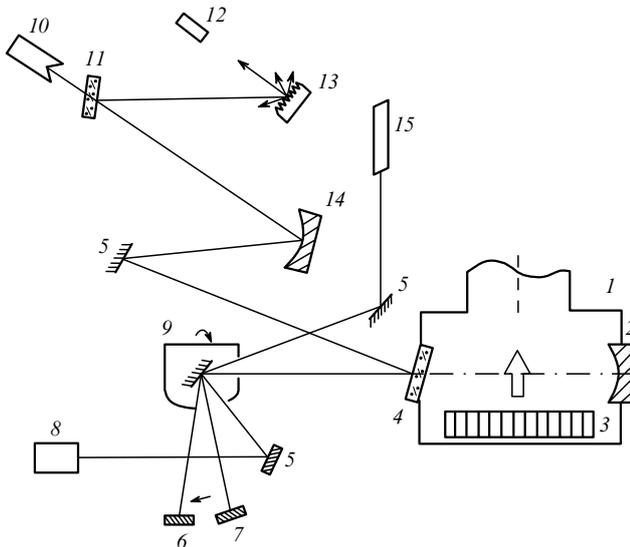


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – барокамера (камера низкого давления) с моделью HF-лазера; 2 – глухое сферическое резонаторное зеркало; 3 – сопловой блок генератора излучения; 4 – выводное флюоритовое окно; 5 – плоские поворотные зеркала; 6 и 7 – плоские резонаторные зеркала; 8 – фотоэлектронный умножитель; 9 – вращающееся зеркало-модулятор скоростной фоторегистрирующей установки; 10 – калориметр; 11 – плоскопараллельная флюоритовая делительная пластина; 12 – детектор излучения (фоторезистор); 13 – матовый рассеиватель излучения; 14 – сферическое зеркало; 15 – юстировочный гелий-неоновый лазер.

Модуляция добротности резонатора обеспечивалась вращением плоского алюминированного зеркала-модулятора 9 со световым размером  $24 \times 24$  мм, размещенного на оси резонатора между плоскими зеркалами 6 и 7 и выводным окном 4. Последовательное перемещение оси резонатора от зеркала 6 к зеркалу 7 вызывало генерацию пары импульсов лазерного излучения за один оборот зеркала 9. Временной интервал между импульсами в паре определялся расстоянием между центрами зеркал 6 и 7 (40 мм), а также расстоянием от этих зеркал до оси вращающегося зеркала 9 (1720 мм) и периодом его вращения. Расчетный угол разъюстировки (угол поворота зеркала, приводящий к выключению добротности) составил  $\theta_{calc} = 1.16 \times 10^{-3}$  рад.

Средняя мощность лазерного излучения измерялась калориметром 10 фирмы Coherent Radiation (США) (модель M201, постоянная времени 1 с). Часть излучения, отраженного от плоской флюоритовой пластины 11, рассеивалась матовой алюминиевой пластиной 13. Рассеянное излучение детектировалось фотоприемником 12 на основе германия, легированного золотом. Электрический сигнал от фотоприемника 12 регистрировался запоминающим осциллографом TDS-3052B фирмы Tektronix (США). Осциллограф запускался импульсным сигналом от фотоэлектронного умножителя, на катод которого попадал отраженный зеркалом 9 пучок гелий-неонового лазера 15.

Период вращения зеркала-модулятора определялся по длительности интервала времени между соседними электрическими импульсами, которые вырабатывались электромагнитным датчиком, размещенным на приводе вращения зеркала, при каждом его обороте. Импульсы от датчика регистрировались в реальном масштабе времени на экране электронно-лучевого осциллографа Type 535 (Tektronix), на второй канал которого поступал сигнал от калориметра 10.

## 3. Результаты экспериментов

Результаты измерений периода  $T$  и частоты  $f$  вращения зеркала-модулятора помещены в табл. 1. Там же приведены зависящие от  $T$  значения средней мощности  $P_T$  импульсно-периодического излучения, длительности  $t_T$  переднего фронта импульса, длительности  $t_{0,5}$  импульса на полувысоте и длительности  $t_{0,1}$  импульса (по уровню 0.1 от максимума), пиковой мощности  $P_{peak}$  для пары импульсов лазерного излучения, интервала между импульсами  $\Delta t_{2,1}$ , времени включения резонатора  $t_{sw}$  и времени роста его добротности  $t_Q$ . Временные характеристики импульсов, полученные при обработке их осциллограмм, показаны на рис. 2.

В режиме квазистационарной генерации (при малой скорости включения добротности резонатора) временные зависимости добротности резонатора и импульса излучения, по-видимому, совпадают, т. е.  $t_{0,1} = t_{sw}$ . Полагая, что эти зависимости симметричны во времени, можно определить экспериментальное значение угла разъюстировки (поворота зеркала) резонатора  $\theta_{exp} = 2\pi f t_{sw}$ . Такому режиму соответствует осциллограмма на рис. 2, а. Оказалось, что угол разъюстировки  $\theta_{exp} = 2.62 \times 10^{-3}$  рад несколько отличается от расчетного значения  $\theta_{calc} = 1.16 \times 10^{-3}$  рад. Причем, если расходимость излучения остается постоянной, то угол разъюстировки не зависит от частоты вращения зеркала-модулятора. Осциллограмму на

Табл.1. Энергетические и временные характеристики импульсно-периодического режима работы HF-лазера, полученные в эксперименте.

| T (мс) | f (Гц) | $\bar{P}_r$ (Вт) | Первый импульс |                 |                 |                   | Второй импульс |                 |                 |                   | $\Delta t_{2,1}$ (мкс) | $t_{sw}$ (мс) | $t_Q$ (мкс) |
|--------|--------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------------|---------------|-------------|
|        |        |                  | $t_r$ (мкс)    | $t_{0,5}$ (мкс) | $t_{0,1}$ (мкс) | $P_{peak_1}$ (Вт) | $t_r$ (мкс)    | $t_{0,5}$ (мкс) | $t_{0,1}$ (мкс) | $P_{peak_2}$ (Вт) |                        |               |             |
| 45.5   | 22     | 0.100            | 3.30           | 6.80            | 9.40            | 430               | 3.10           | 6.60            | 9.50            | 380               | 82                     | 9.5           | 4.7         |
| 8      | 125    | 0.121            | 0.45           | 0.64            | 1.43            | 910               | 0.43           | 0.65            | 1.33            | 800               | 15.5                   | 1.7           | 0.83        |
| 4      | 250    | 0.198            | 0.26           | 0.36            | 0.71            | 1700              | 0.17           | 0.32            | 0.65            | 1780              | 7.7                    | 0.83          | 0.42        |
| 2      | 500    | 0.133            | 0.18           | 0.22            | 0.36            | 1370              | 0.087          | 0.15            | 0.25            | 430               | 4.0                    | 0.42          | 0.21        |
| 1      | 1000   | 0.045            | 0.046          | 0.09            | 0.16            | 640               | 0.036          | 0.09            | 0.15            | 33                | 1.94                   | 0.21          | 0.11        |

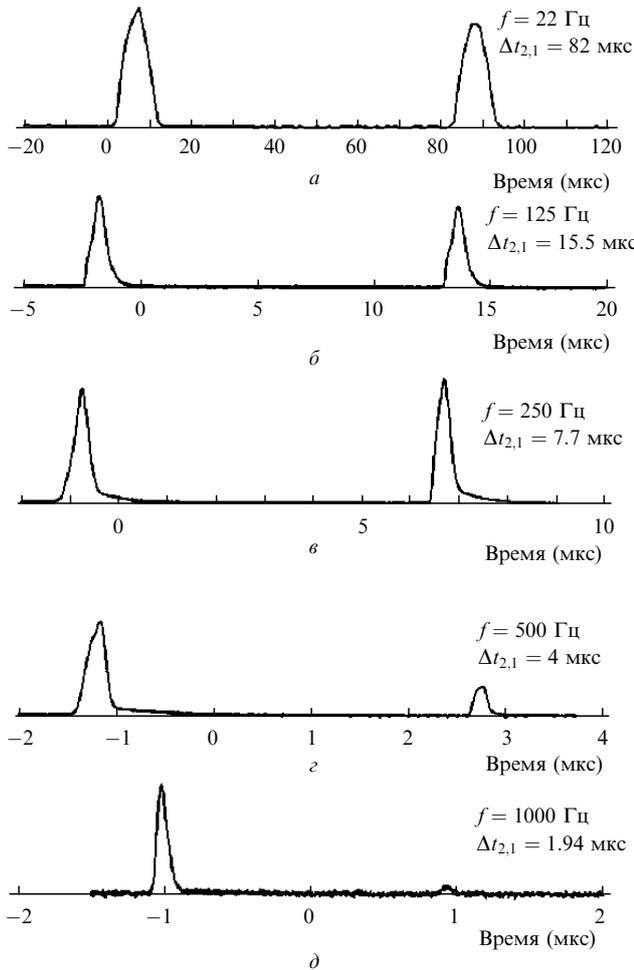


рис.2. Осциллограммы импульсов излучения HF-лазера, работающего в режиме модуляции добротности резонатора, при различных частотах вращения зеркала-модулятора и промежутках времени между двумя импульсами.

рис.2,а можно использовать для калибровки канала регистрации формы импульсов лазерного излучения.

Приняв величину угла разъюстировки резонатора постоянной ( $\theta_{exp} = 2.62 \times 10^{-3}$  рад), можно оценить время включения резонатора  $t_{sw} = T\theta_{exp}/(4\pi)$  и роста его добротности  $t_Q = t_{sw}/2$ . Полученные в результате обработки экспериментальных данных по методике работы [10] энергетические и временные характеристики ИПР приведены в табл.1.

При определении времени восстановления усилительных свойств активной среды сравнивались значения пиковых мощностей лазерного излучения  $P_{peak_1}$  и  $P_{peak_2}$  (см. табл.1), полученные при одной и той же частоте вращения зеркала. Вариант, когда  $P_{peak_1}$  значительно больше  $P_{peak_2}$ , отвечает ситуации, в которой усилительные свойства активной среды еще не восстановились. Время вос-

становления инверсии можно оценить по интервалу между импульсами  $\Delta t_{2,1}$ . Такая оценка дает диапазон времен восстановления инверсии 6–7 мкс.

#### 4. Результаты расчетов

В теоретической части исследования использовались две расчетные модели, при разработке которых не ставилась задача подробного описания газодинамических, химических и радиационных процессов в активной среде HF/DF-лазера с МДР, что потребовало бы слишком больших ресурсов машинного времени. В рамках этих моделей активная среда описывается как однородная, а ее лазерные параметры меняются только в направлении течения газового потока. В первой модели [11] для вычисления профиля коэффициента усиления составляется уравнение для этого коэффициента с введением обобщающих членов, учитывающих процессы накачки и релаксации. Варьированием этих членов достигается согласование профиля усиления с профилем, полученным в [12] при использовании численной модели HF/DF-лазера в приближении «узкого канала». Во второй модели подгоночным параметром является скорость наработки колебательно-возбужденных молекул HF( $\nu$ ) и DF( $\nu$ ) (где  $\nu$  – колебательное квантовое число) вдоль направления течения потока, которая задается искусственным «впрыскиванием» в активную среду определенного количества атомов фтора. Такой прием позволяет согласовать временную зависимость образования колебательно-возбужденных молекул с данными, полученными в [12]. Критерием правильности описания процесса может быть его согласие с экспериментальными данными. В этом смысле обе модели правильно предсказывают величину коэффициента превышения пиковой мощности в режиме МДР над средней мощностью в непрерывном режиме работы лазера  $k = P_{peak}/P_{av}$ , а главное – период времени, за который активная среда успевает восстановить свои усилительные свойства.

На рис.3 представлены расчетная мощность  $P$  генерации на переходе HF/DF( $\nu = 2$ ) → HF/DF( $\nu = 1$ ) при различных частотах вращения зеркала-модулятора, реализованных в эксперименте, а также зависимости от времени коэффициента усиления  $g$  активной среды в точке на оси резонатора с координатой  $x = 12$  мм. Энергии и мощности двух последовательных импульсов генерации в режиме МДР помещены в табл.2.

Качественно результаты выполненных расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Как и в эксперименте, падение энергии второго импульса по сравнению с первым происходит при изменении частоты вращения зеркала-модулятора от 250 до 500 Гц (рис.2, 3). В режиме МДР удается существенно повысить максимальную мощность излучения. По данным расчета при частоте вращения зеркала-модулятора 22 Гц

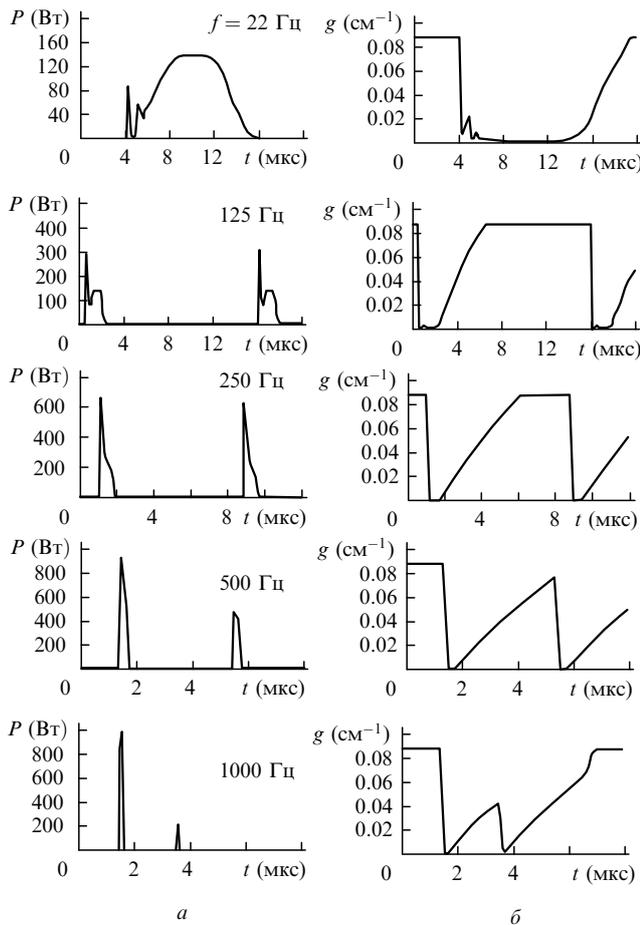


Рис.3. Расчетные профили импульсов генерации на переходе молекулы HF/DF( $v = 2$ ) → HF/DF( $v = 1$ ) при различных частотах вращения зеркала-модулятора, реализованных в эксперименте (а), и зависимости от времени коэффициента усиления активной среды в точке, расположенной на оси резонатора, с координатой  $x = 12$  мм (б).

после релаксационных колебаний, продолжающихся примерно 4 мкс, генерация излучения выходит на стационарный режим со средней мощностью  $P \sim 140$  Вт. Увеличение частоты вращения до 250 Гц приводит к росту пиковой мощности в пять раз (до уровня  $P \sim 700$  Вт) (см. табл.2).

Различие мощностей генерации излучения, приведенных в табл.1 и 2, объясняется тем, что расчет проводился с учетом только одной колебательной полосы  $v = 2 \rightarrow v = 1$ . В эксперименте же генерация имеет место на двух

колебательных полосах  $v = 1 \rightarrow v = 0$  и  $v = 2 \rightarrow v = 1$ . По данным [13] при близких параметрах резонаторов соотношение мощностей излучения в полосах  $v = 1 \rightarrow v = 0$  ( $P_{1-0}$ ) и  $v = 2 \rightarrow v = 1$  ( $P_{2-1}$ ) составляет  $P_{1-0}/P_{2-1} = 0.57/0.43$ . Если учесть это соотношение, то рассчитанная и экспериментальная мощности излучения оказываются достаточно близки. Следует также отметить, что при наличии генерации на полосе  $v = 1 \rightarrow v = 0$  происходит быстрое расселение уровня  $v = 1$ ; с учетом этого процесса расчетное значение мощности в полосе  $v = 2 \rightarrow v = 1$  должно возрасти.

Расчет генерации DF-лазера в режиме МДР не выявил никаких принципиальных отличий от HF-лазера. Несмотря на меньшую энергию импульса излучения и его длительность прямо связаны с более низким коэффициентом усиления активной среды DF-лазера.

Интересный результат получен при использовании модели первого типа для расчета диаграммы направленности излучения HF-лазера, работающего в режиме МДР. Оказалось, что МДР методом вращающегося зеркала неудовлетворительна с точки зрения формирования правильной пространственной структуры пучка излучения: для применявшегося в эксперименте устойчивого резонатора угловая расходимость лазерного излучения оказалась на порядок больше дифракционной.

### 5. Обсуждение результатов

Данные прямых измерений указывают на то, что в некоторой области частот модуляции средняя мощность излучения HF-лазера в ИПР растет с уменьшением времени включения добротности. Этот факт свидетельствует о существовании режима гигантского импульса (т. е. режима накопления инверсии). Косвенные данные, полученные при обработке экспериментальной информации, показывают, что в реализованных нами условиях эксперимента пиковая мощность излучения в ИПР не менее чем в четыре раза превысила мощность излучения в непрерывном режиме. Средняя мощность излучения в ИПР ниже, чем мощность непрерывного излучения, но она растет с увеличением частоты модуляции примерно в два раза. Этот результат полностью согласуется с данными, полученными нами в [10] на модели малоразмерного HF-лазера. Кроме того, полученные в настоящей работе энергетические характеристики лазерного излучения превышают таковые из работы [10] более чем в два раза (пропорционально увеличению протяженности активной среды вдоль оптической оси резонатора).

Анализ экспериментальных данных показал, что время полного восстановления профиля коэффициента усиления активной среды (или запаса ее колебательной энергии) составляет 6–7 мкс. Следовательно, для получения максимально мощных импульсов излучения для данной модели HF-лазера частота модуляции не должна превышать 150 кГц. Для сохранения средней мощности излучения можно пожертвовать величиной пиковой мощности импульса (т. е. работать в режиме неполного восстановления инверсии активной среды). Как показано в [9], этого можно достигнуть при работе с частотой модуляции 250 кГц, потеряв половину средней мощности по сравнению с непрерывным режимом.

Эксперименты показали, что форма импульсов при МДР в основном сохраняется, а их длительность уменьшается практически синхронно с увеличением частоты

Табл.2. Расчетные значения энергетических характеристик двух последовательных импульсов генерации.

| Импульс | Частота вращения зеркала-модулятора (Гц) | Энергия импульса (мДж) | Максимальная мощность импульса (Вт) |
|---------|--|------------------------|-------------------------------------|
| Первый  | 22                                       | 1                      | 141                                 |
|         | 125                                      | 0.23                   | 298                                 |
|         | 250                                      | 0.24                   | 695                                 |
|         | 500                                      | 0.22                   | 954                                 |
|         | 1000                                     | 0.093                  | 993                                 |
| Второй  | 22                                       | 1                      | 141                                 |
|         | 125                                      | 0.23                   | 297                                 |
|         | 250                                      | 0.24                   | 689                                 |
|         | 500                                      | 0.11                   | 480                                 |
|         | 1000                                     | 0.022                  | 208                                 |

вращения зеркала-модулятора. В оптимальном случае (при максимальном превышении импульсной мощности над непрерывной) длительность импульса на половине высоты составляет примерно 350 нс.

В настоящей работе задача полной расчетной оптимизации режима МДР не ставилась. Однако некоторые предварительные результаты были получены. Так, в рамках обеих расчетных моделей показано, что значение коэффициента  $k$  строго зависит от времени включения добротности резонатора (которое в расчете имитировалось временем изменения потерь резонатора). Моделировалась ситуация, когда потери в резонаторе менялись не в результате вращения зеркала, а с помощью идеального модулятора, пропускание  $\tau$  которого изменялось мгновенно от 0 до 1. Время открытия такого модулятора в расчетах принималось равным 1 мкс, что примерно соответствовало режиму его работы при вращении зеркала с частотой 250 Гц. Оказалось, что увеличение скорости изменения потерь резонатора позволило при прочих равных условиях увеличить пиковую мощность импульса почти в полтора раза.

Расчеты усилительных свойств активной среды НФ-лазера показали, что при частоте вращения зеркала-модулятора 250 Гц практически полное восстановление стационарного распределения коэффициента усиления происходит за промежуток времени между двумя импульсами  $\Delta t_{2,1} \sim 7.5$  мкс. Это означает, что энергии импульсов при работе лазера в импульсном режиме и в ИПР с частотой модуляции  $\nu = 1/\Delta t_{2,1} \sim 133$  кГц одинаковы. При частоте вращения зеркала-модулятора 1000 Гц инверсия в активной среде к моменту начала второго импульса не успевает восстановиться, что вызывает значительное падение энергии второго импульса по сравнению с первым. Этот эффект приводит к снижению энергии импульсов излучения при переходе от импульсного режима генерации к ИПР.

В режиме МДР профиль импульса излучения зависит от скорости изменения потерь резонатора: чем быстрее «открывается» резонатор, тем выше ожидаемый уровень мгновенной мощности импульса. Расчет временной зависимости потерь излучения при частотах вращения зеркала-модулятора 125 и 1000 Гц показал, что фронт изменения потерь в резонаторе при вращении зеркала-модулятора сравнительно плавный и его протяженность составляет примерно 25 % от длительности импульса генерации.

Другим фактором, влияющим на пиковую мощность в ИПР, является длина резонатора. От нее при заданном уровне потерь зависит время жизни фотонов. При снижении потерь уменьшается период релаксационных колебаний мощности выходного излучения и при определенных условиях может быть достигнут выигрыш в мгновенной мощности импульса при фиксированных параметрах усиления активной среды. Этот факт подтвержден расчетом.

Как отмечено выше, расчетный анализ показал, что для применявшегося в экспериментах устойчивого резонатора угловая расходимость излучения на порядок превышает дифракционную. Переход к неустойчивому телескопическому резонатору мало помогает делу, поскольку при этом угловой спектр пучка расширяется почти на

порядок (при частоте модуляции 250 Гц), а центр тяжести пучка смещается относительно оси съюстированного резонатора в результате его динамической разъюстировки. В связи с этим предложена схема с МДР вращающимся зеркалом в неустойчивом резонаторе несколько иного типа [11], когда смещение оси пучка не приводит к разъюстировке резонатора. Рассмотрение этой схемы и подробный теоретический анализ пространственно-угловых характеристик излучения НФ-лазера, работающего в режиме МДР, предполагается провести в наших дальнейших исследованиях.

## 6. Заключение

Экспериментально подтверждена возможность перевода излучения непрерывного химического среднеразмерного НФ-лазера (с протяженностью активной среды вдоль оптической оси резонатора 400 мм) в импульсно-периодический режим с частотой следования импульсов до 250 кГц. При частоте модуляции  $\sim 150$  кГц пиковая мощность излучения в импульсно-периодическом режиме не менее чем в четыре раза превышает мощность излучения в непрерывном режиме. Определено влияние частоты модуляции на среднюю мощность в импульсно-периодическом режиме и время полного восстановления профиля коэффициента усиления активной среды, которое составляет 6–7 мкс. Разработаны две численные модели, описывающие динамику генерации НФ/ДФ-лазера в режиме модуляции добротности резонатора. Эти модели находятся в удовлетворительном согласии с экспериментом. В частности, правильно предсказывается превышение пиковой мощности над средней мощностью в непрерывном режиме работы лазера, а также период времени, в течение которого активная среда восстанавливает свои усилительные свойства.

1. Григорьев П.Г., Степанов А.А., Щеглов В.А. *Кр. сообщ. физ., ФИАН*, № 6, 28 (1979).
2. Mead F.B., Myrabo L.M., Messitt D.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3343**, 560 (1998).
3. Schall W.O., Bohn W.L., Eckel H.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4065**, 472 (2000).
4. Apollonov V.V., Kijko V.V., Kislov V.I., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 1011 (2005).
5. Аполлонов В.В., Кийко В.В., Кислов В.И. и др. *Квантовая электроника*, **33**, 753 (2003).
6. Ambrosio C.D., Fuss W., Schmid W.E., Kompa K.I. *Max-Planck Institut für Quantenoptik International Report MPQ*, 284 (1985).
7. Александров Б.С., Белавин В.А., Дымшиц Б.М., Корещкий Я.П. *Квантовая электроника*, **27**, 3 (1999).
8. Highland R., Crowell P., Hager G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1225**, 512 (1990).
9. Воробьев А.П., Исхаков В.А., Машенджинов В.И. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 606 (1998).
10. Максимов Ю.П., Машенджинов В.И., Ревич В.Э. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 233 (2005).
11. Купренюк В.И., Максимов Ю.П., Машенджинов В.И., Родионов А.Ю., Ротинян М.А., Федоров И.А. *Квантовая электроника*, **37**, 248 (2007).
12. Поспелов В.А. *Численные методы механики сплошной среды*, **3**, 99 (1982).
13. Федоров И.А., Максимов Ю.П., Третьяков Н.Е. и др. *Оптика и спектроскопия*, **93**, 1025 (2002).