

Непрерывный химический HF-лазер, работающий в режиме модуляции добротности резонатора

Ю.П.Максимов, В.И.Машенджинов, В.Э.Ревич, М.А.Ротинян,
В.В.Судариков, Н.Е.Третьяков, И.А.Федоров, В.А.Эллер, А.Л.Эцина

Проведено экспериментальное исследование характеристик непрерывного химического HF-лазера с механической модуляцией добротности резонатора с частотой до 1000 Гц. Показано, что в условиях эксперимента пиковая мощность импульсов лазерного излучения возрастает не менее чем в пять раз в диапазоне частот модуляции 17–250 Гц. Средняя импульсно-периодическая мощность оказалась заметно ниже, чем непрерывная, но ее рост с увеличением частоты модуляции (в том же диапазоне) происходит быстрее, нежели рост пиковой мощности. Обсуждаются возможные причины выявленных различий экспериментальных и расчетных характеристик лазера.

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

1. Введение

Для лазеров проточного типа с непрерывной накачкой при наличии некоторых обсуждаемых ниже условий может быть реализован импульсно-периодический режим работы, отличающийся тем, что пиковая мощность импульса многократно возрастает по сравнению с мощностью непрерывного излучения, а средняя мощность, хотя и снижается, но в гораздо меньшей степени. Наиболее приемлемым способом реализации импульсно-периодического режима является, по-видимому, метод модуляции добротности резонатора [1–3].

Эффективность импульсно-периодического режима зависит от кинетических характеристик процессов, протекающих в активной среде (таких как скорость нарастания интенсивности поля излучения, скорость восстановления инверсии, скорость релаксационных процессов и т. п.), а также от способа осуществления модуляции добротности. Импульсно-периодический режим работы непрерывных химических лазеров (НХЛ) на HF(DF) (HF(DF)-НХЛ) впервые был предложен в работе [4]. При этом указывалось на возможное повышение эффективности резонаторов при использовании обращения волнового фронта (ОВФ) в газовых средах, поскольку эффективность последнего быстро растет с повышением интенсивности излучения [5].

Существуют и другие преимущества химических лазеров, работающих в импульсно-периодическом режиме, связанные со спецификой взаимодействия излучения с физическими объектами, с особенностями распространения излучения в атмосфере, а также с возможностью получения при модуляции добротности резонатора частоты следования импульсов, недостижимой в традици-

онных методах импульсной накачки. В работе [4] был предложен импульсно-периодический режим с частотой следования импульсов, равной частоте смены среды в резонаторе HF(DF)-НХЛ, однако при этом, согласно расчету, заметно (примерно в пять раз) снижалась средняя мощность излучения по сравнению с непрерывным режимом работы лазера.

На основе объединения расчетных методов и компьютерного моделирования с использованием программ для анализа процессов в непрерывных и импульсных химических лазерах в работе [6] было проведено моделирование импульсно-периодического режима работы HF-НХЛ и предложены возможные пути его реализации в эксперименте. Выполненные расчеты энергетических параметров импульса генерации подтвердили выводы, полученные в [4], хотя теоретические модели, использованные в [4] и [6], существенно различались. Кроме того, в работе [6] были рассчитаны энергетические, временные и спектральные характеристики излучения, а также предложен метод моделирования динамики восстановления усилительных свойств активной среды HF-НХЛ после ее насыщения. Это позволило впервые получить оценки верхней границы частоты следования импульсов, еще не приводящей к падению энергии в импульсе, и частоты, обеспечивающей максимальную среднюю мощность излучения в импульсно-периодическом режиме.

Следует отметить, что режим модуляции добротности достаточно труден для экспериментальной реализации, в связи с чем в настоящей работе решались предварительные задачи, которые заключались в следующем: показать, что режим модуляции добротности резонатора действительно приводит к возрастанию пиковой мощности импульса в непрерывном HF-лазере, оценить временные характеристики импульсно-периодического режима применительно к активной среде реального HF-лазера и получить экспериментальные данные для оптимизации метода модуляции добротности и постановки экспериментов по определению времени восстановления усиления в активной среде HF-лазера.

Для реализации режима модуляции добротности ре-

Ю.П.Максимов, В.И.Машенджинов, В.Э.Ревич, М.А.Ротинян, В.В.Судариков, Н.Е.Третьяков, И.А.Федоров, В.А.Эллер, А.Л.Эцина. ФГУП «Российский научный центр «Прикладная химия», Россия, 197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14; e-mail: etsina@online.ru, rotinian@rscan.spb.ru

зонатора был выбран метод вращающегося зеркала, сопряженного с неподвижными зеркалами резонатора [7]. Преимуществами этого метода являются использование существующих высокооборотных электрошпинделей, стопроцентная глубина модуляции, достаточно высокая лучевая прочность модулятора и возможность использования относительно широких апертур модулируемых пучков. К недостаткам метода следует отнести трудность независимого изменения скорости и времени включения добротности, а также неполное заполнение резонатора активной средой.

2. Экспериментальная установка

Исследование импульсно-периодического режима работы непрерывного НФ-лазера проводилось на хорошо отработанной стендовой модели с сопловым блоком радиального расширения [8]. Оптико-измерительная схема эксперимента показана на рис.1. Стендовая модель размещалась в барокамере низкого давления 11, на двух противоположных стенках которой крепились сферическое глухое зеркало резонатора 1 с алюминиевым покрытием (радиус кривизны $R = 10765$ мм, световой диаметр 170 мм) и выходное флюоритовое окно 10. Выходное зеркало 3 (флюоритовая пластина с диэлектрическим покрытием и пропусканием $\tau = 0.05$) размещалась на расстоянии $L = 4560$ мм от глухого зеркала резонатора 1. Модуляция добротности обеспечивалась вращением плоского алюминированного зеркала (узел 2 скоростной фоторегистрирующей установки), установленного внутри резонатора между выходным диэлектрическим зеркалом 3 и выходным окном 10. Световой диаметр подвижного зеркала скоростного фоторегистратора (СФР) составлял 25 мм. Расчетный угол разбустировки θ^* (угол поворота зеркала, соответствующий выключению добротности и принятый равным углу расходимости излучения) был равен $\sim 1.5 \times 10^{-3}$ рад. Юстировка резонатора проводилась с помощью гелий-неонового лазера.

Средняя мощность лазерного излучения измерялась калориметром 8 фирмы Coherent Radiation (США) (модель М201, постоянная времени 1 с), на приемную пло-

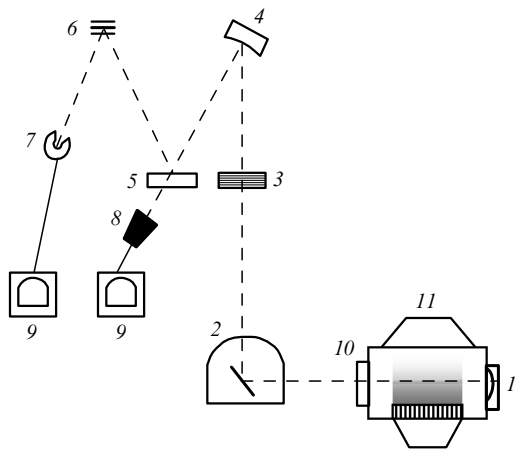


Рис.1. Оптико-измерительная схема установки НФ-лазера, работающего в режиме модуляции добротности резонатора:

1 – глухое зеркало резонатора; 2 – СФР; 3 – выходное зеркало резонатора; 4 – фокусирующее зеркало; 5 – делитель излучения; 6 – рассеиватель; 7 – фотодетектор; 8 – калориметр; 9 – осциллограф; 10 – выходное окно; 11 – барокамера с активной средой НФ-лазера.

щадку которого фокусировалось 94 % энергии лазерного излучения. Оставшаяся часть излучения, отраженная от плоской флюоритовой пластины 5, рассеивалась матированной алюминиевой пластиной 6 и детектировалась фотоприемником 7, в качестве которого использовалось фотосопротивление ФСГ-22-3А1 на основе германия, легированного золотом. Электрический сигнал от калориметра 8 и фотоприемника 7 регистрировался светолучевым осциллографом С1-64А и электронно-лучевыми осциллографами С8-14, работавшими в режиме запоминания. Для достижения максимального временного разрешения фотосопротивление ФСГ-22-3А1 было нагружено на резистор с номинальным сопротивлением 50 Ом. С целью предотвращения искажений импульсного электрического сигнала при его передаче по длинному (10 м) коаксиальному кабелю параллельно входу осциллографов был подключен резистор с номинальным сопротивлением 50 Ом.

Период между последовательными включениями добротности резонатора, принятый равным периоду вращения зеркала СФР, определялся по длительности промежутка между соседними электрическими импульсами, которые подавались от электромагнитного датчика, установленного на приводе вращения зеркала, при каждом обороте зеркала. Импульсы от датчика регистрировались в реальном масштабе времени на экране электронно-лучевого осциллографа С1-68.

Предварительная юстировка резонатора и оптической схемы в целом выполнялась при открытой барокамере. Оптическая ось резонатора выставлялась на расстоянии 13 мм от среза соплового блока, после чего барокамера закрывалась и откачивалась до давления ~ 0.1 Тор. После точной юстировки резонатора запускался привод вращения зеркала СФР, и при достижении выбранной скорости вращения зеркала осуществлялся пуск НФ-лазера. Через три-четыре секунды после начала подачи компонентов топлива в сопловый блок средняя мощность лазерного излучения устанавливалась на стационарном уровне, который сохранялся в течение трех секунд. Изменялись характеристики десяти импульсов с максимальной амплитудой. С помощью фотоприемника 7 и светолучевого осциллографа С1-64А визуально отслеживалась динамика роста амплитуды импульсов. Для экспериментального исследования импульсно-периодического режима выбраны параметры стендовой модели лазера, большинство из которых были близки к параметрам расчетной модели. Указанные параметры приведены в табл.1.

3. Экспериментальные результаты

В табл.2 даны результаты измерений периода T и частоты f вращения зеркала СФР, а также зависящих от T средней мощности \bar{P}_R импульсно-периодического излучения, длительности τ_r переднего фронта импульса, длительности $\tau_{0.5}$ импульса на полувысоте и длительности $\tau_{0.1}$ импульса по уровню 0.1 от максимума. Усредненные временные характеристики импульсов получены при обработке их осциллограмм. Примеры усредненных осциллограмм приведены на рис.2.

В режиме квазистационарной генерации (при малой скорости включения добротности) временные зависимости добротности резонатора и мощности импульса излучения, по-видимому, совпадают, т. е. $\tau_{0.1} = t_{sw}$ (где t_{sw} –

время включения резонатора). Предполагая, кроме того, что эти зависимости симметричны во времени, можно определить экспериментальный угол разъюстировки (поворота зеркала) резонатора $\theta_0 = 2\pi f t_{sw}$. Такой режим показан на рис.2,а. Угол разъюстировки не зависит от частоты вращения модулятора при условии, что расходимость излучения остается постоянной. Эти же осциллограммы могут служить для определения скважности $q = T/t_{sw}$ включения добротности в импульсно-периодическом режиме. Величина q связывает квазистационарную среднюю мощность \bar{P}_R импульсно-периодического режима и мощность P_{cw} непрерывного режима излучения следующим образом:

$$q\bar{P}_R = P_{cw}. \tag{1}$$

Для $T = 60 \times 10^{-3}$ с и $\tau_{0,1} = 20 \times 10^{-6}$ с скважность $q = 3000$, $\bar{P}_R = 0.056$ Вт, а $P_{cw} = 170$ Вт.

В общем случае импульсно-периодического излучения

$$E_p = \bar{P}_R T = \int_0^{\tau_{0,1}} P_R dt = P_{peak} \tau_{eff}, \tag{2}$$

$$P_{peak} = \frac{\bar{P}_R T}{\tau_{eff}}, \tag{3}$$

где E_p – энергия импульса; P_{peak} – его пиковая мощность;

$$\tau_{eff} = \frac{1}{P_{peak}} \int_0^{\tau_{0,1}} P_R dt \tag{4}$$

– эффективная длительность импульса, которая определяется по осциллограмме мощности импульса. Если угол разъюстировки резонатора $\theta_0 = 2 \times 10^{-3}$ рад не меняется при изменении скорости вращения зеркала, то можно оценить время включения резонатора $t_{sw} = \theta_0/(4\pi f)$ и время роста его добротности $t_Q = t_{sw}/2$.

Полученные указанным выше способом пиковая мощность импульса P_{peak} , время включения резонатора t_{sw} и время нарастания его добротности t_Q приведены в табл.3.

4. Обсуждение результатов

Данные прямых измерений, приведенные в табл.2,

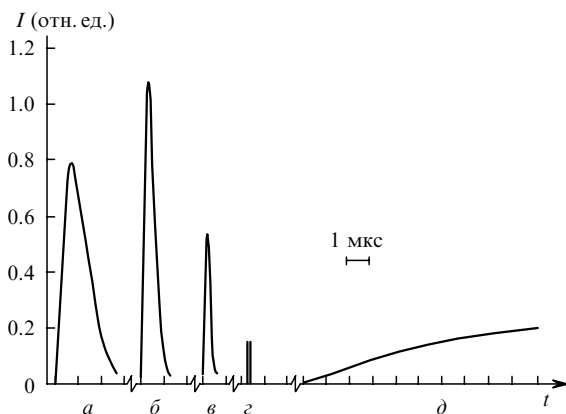


Рис.2. Усредненные осциллограммы импульсов HF-лазера в режиме модуляции добротности резонатора при частоте модуляции 125 (а), 250 (б), 500 (в), 1000 (г) и 17 Гц (д).

Табл.1. Параметры расчетной модели и экспериментальной установки для HF-лазера, работающего в режиме модуляции добротности резонатора.

Параметр	Расчетная модель	Экспериментальная установка
Коэффициент избытка окислителя α	1.7	1.5–1.6
Степень разбавления окислителя ψ	10	11–13.5
Давление торможения окислителя p_0 (Па)	1.2×10^5	1.4×10^3
Температура торможения горючего T_f (К)	300	300
Температура стенки камеры сгорания T_w (К)	300	300
Давление на входе в резонатор p_r (Па)	532	664
Число Маха в потоке окислителя M_0	4.8	4.3
Число Маха в струе горючего M_f	1	2.8
Средняя скорость потока в резонаторе u (м/с)	2500	2000
Ширина зоны генерации вдоль потока d (мм)	35	50
Длина активной среды вдоль оси резонатора l (мм)	250	180
Длина резонатора L (мм)	250	4650
Максимальный коэффициент усиления g (m^{-1})	9.5	7
Коэффициент потерь k (m^{-1})	0.21	0.9
Коэффициент заполнения резонатора $\mu = l/L$	1	~ 0.04

Табл.2. Характеристики импульсно-периодического излучения HF-лазера, работающего в режиме модуляции добротности резонатора.

T (мс)	f (Гц)	\bar{P}_R (Вт)	τ_r (мкс)	$\tau_{0,5}$ (мкс)	$\tau_{0,1}$ (мкс)
60	17	0.056	10	–	–
8	125	0.084	0.9	1.2	2.6
4	250	0.146	0.6	0.55	1.3
2	500	0.106	0.4	0.45	0.75
1	1000	0.008	0.05	–	0.10

свидетельствуют о том, что в некоторой области частот импульсно-периодического режима излучения HF-НХЛ средняя мощность увеличивается с уменьшением времени включения добротности. Этот факт доказывает существование режима гигантского импульса (т.е. накопления инверсии) для таких активных сред. Результаты косвенных измерений (табл.3), полученные при обработке экспериментальных данных, показывают, что в условиях эксперимента пиковая мощность излучения импульсно-периодического режима не менее чем в пять раз превысила мощность излучения непрерывного режима. Средняя же мощность излучения импульсно-периодического режима ниже, чем мощность непрерывного излучения, но она растет с увеличением частоты модуляции.

Расчет [6], однако, предсказывает 30-кратное превышение пиковой мощности импульсно-периодического режима над мощностью излучения непрерывного режима генерации HF-лазера. Кроме того, обнаружались и дру-

Табл.3. Характеристики процесса модуляции добротности резонатора HF-лазера.

T (мс)	f (Гц)	t_{sw} (мкс)	t_Q (мкс)	τ_{eff} (мкс)	P_{peak} (Вт)
60	17	20	10	20	168
8	125	1.33	0.66	1	672
4	250	0.67	0.34	0.65	898
2	500	0.33	0.16	0.46	476
1	1000	0.17	0.08	0.05	160

гие различия в результатах расчета и эксперимента. Так, оказалось, что угол разбюстировки резонатора $\theta_0 = 2\pi \times ft_{sw} \approx 2 \times 10^{-3}$ рад отличается от расчетного угла расходимости $\theta^* \approx 1.5 \times 10^{-3}$ рад. Расчетное время нарастания интенсивности поля излучения t_I в режиме модуляции добротности резонатора (при мгновенном включении добротности) составило 14 нс. Экспериментальное значение времени нарастания фронта импульса $\tau_f = 600$ нс при частоте модуляции 250 Гц (рис.2,б) превысило время роста добротности $t_Q = 340$ нс. Увеличение частоты модуляции до 500 и 1000 Гц (и соответственно уменьшение времени роста добротности) привело к падению пиковой мощности импульсно-периодического режима, что также не совпадает с расчетом.

Объяснение отмеченных различий в результатах можно получить в ходе сравнительного анализа экспериментальной и расчетной моделей импульсно-периодического режима работы HF-лазера. Наиболее существенно различаются экспериментальные и расчетные коэффициенты заполнения резонатора μ (см. табл.1). Различие пороговых коэффициентов усиления, по-видимому, меньше.

Выражение для скорости роста плотности потока фотонов I в резонаторе при мгновенном включении добротности в приближении двухуровневой модели и в предположении отсутствия релаксации записывается следующим образом:

$$\frac{1}{c} \frac{dI}{dt} = \mu(g - k)I, \quad (5)$$

$$\frac{dg}{dt} = -2\sigma gI, \quad (6)$$

где c – скорость света; g – коэффициент усиления активной среды; k – коэффициент потерь излучения; σ – сечение вынужденного излучения. Следовательно, характерное время t_I роста интенсивности поля (без учета насыщения, описываемого уравнением (6)) оценивается по формуле $t_I \sim (g - k)/c$. Величины, входящие в уравнение (5), усредняются по длине резонатора. В расчетной модели предполагалось полное заполнение резонатора генерирующей средой, а в экспериментальной – заполнение только части объема среды (длиной l) резонатора с коэффициентом заполнения $\mu = 3.85 \times 10^{-2}$ (табл.1). В результате усреднения величин в уравнении переноса поля (5) скорость роста интенсивности поля в экспериментальной модели оказывается в $\mu^{-1} \approx 26$ раз меньше, чем в расчетной модели (при $\mu = 1$). С учетом времени роста добротности (табл.3) время нарастания интенсивности поля оказывается сопоставимым с временем роста переднего фронта импульса в импульсно-периодическом режиме (рис.2).

Неполное заполнение объема резонатора активной средой явилось также основной причиной падения мощности импульсно-периодического режима при частотах модуляции 500 и 1000 Гц. Действительно, для этих частот модуляции время включения добротности (время жизни резонатора) t_{sw} составляет 330 и 170 нс соответственно.

Поскольку время возрастания интенсивности поля при $\mu = 3.85 \times 10^{-2} \approx 1/26$ не может быть меньше, чем $t_I/\mu = 14 \text{ нс} \cdot 26 = 364$ нс (без учета времени увеличения добротности), то «времени жизни» резонатора просто не хватило бы для насыщения среды.

Результаты исследования импульсно-периодического режима работы HF-лазера методом оптико-механической модуляции добротности резонатора позволяют надеяться на реализацию расчетных параметров импульса излучения и осуществление импульсно-периодического режима при согласовании экспериментальных и расчетных параметров модуляции добротности. Предсказываемая расчетом 50 %-ная энергетическая эффективность относительно непрерывного исследуемого импульсного режима, связанная со скоростью восстановления инверсии в среде HF-лазера, должна быть подтверждена дополнительно.

5. Заключение

Экспериментально установлено возрастание пиковой мощности импульсов излучения непрерывного химического HF-лазера при его работе в режиме модуляции добротности резонатора в диапазоне частот 17–250 Гц. Средняя мощность импульсно-периодического излучения в режиме оптико-механической модуляции добротности резонатора (роста частоты модуляции) быстрее, чем пиковая мощность. Выявленные различия экспериментальных и расчетных характеристик режима модуляции добротности, в частности падение пиковой и средней мощностей на частотах 500–1000 Гц, связаны главным образом с неполным заполнением объема резонатора активной средой. Поэтому в дальнейших исследованиях предполагается согласовать параметры расчетной и экспериментальной моделей HF-лазера, обеспечить получение больших пиковой и средней мощностей, а также определить скорость восстановления инверсии в лазерной среде, что позволит приблизиться к реализации импульсно-периодического режима [7].

Авторы выражают благодарность С.В.Конкину и Ю.Л.Самотоеву за помощь в проведении экспериментов.

1. Микаэлян А.Л., Тер-Микаэлян М.Л., Турков Ю.Г. *Оптические генераторы на твердом теле* (М.: Сов. радио, 1967).
2. *Методы расчета оптических квантовых генераторов. Т.II*. Под ред. Б.И.Степанова (Минск: Наука и техника, 1968).
3. Звелто О. *Принципы лазеров* (М.: Мир, 1990).
4. Григорьев П.Г., Степанов А.А., Щеглов В.А. *Кр. сообщ. физ.*, № 6, 28 (1979).
5. Рагульский В.В. *Обращение волнового фронта при вынужденном рассеянии света* (М.: Наука, 1990).
6. Воробьев А.П., Исаков В.А., Машенджинов В.И., Ревич В.Э., Ротинян М.А., Шур М.Л. *Квантовая электроника*, **25**, 606 (1998).
7. Воробьев А.П., Исаков В.А., Машенджинов В.И., Ревич В.Э., Ротинян М.А., Шур М.Л. Патент РФ № 2134006, МКИ Н01S3/22. Заявка от 29.07.97.
8. Конкин С.В., Ребонэ В.К., Ротинян М.А., Федоров И.А. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 409 (1996).