

Экспериментальное исследование нецепного HF-лазера на тяжелых углеводородах

В.Д.Булаев*, В.В.Куликов*, В.Н.Петин*, В.И.Югов**

Экспериментально исследованы выходные характеристики нецепного электроразрядного HF-лазера замкнутого цикла в импульсном и импульсно-периодическом режимах накачки при скоростях нарастания разрядного тока $\sim 10^{10}$ А/с. С использованием анизотропно-резистивного катода на смесях тяжелых углеводородов с элегазом ($SF_6 - (C_3H_8 + C_4H_{10})$) достигнут удельный энерговыход 200 Дж/л. Применение неустойчивого телескопического резонатора обеспечивает расходимость излучения, близкую к дифракционному пределу.

Ключевые слова: нецепной HF-лазер, тяжелые углеводороды, анизотропно-резистивный электрод.

1. Введение

Мощные импульсно-периодические газовые лазеры, особенно с замкнутым циклом прокачки лазерной смеси, могут найти применение в ряде задач, в которых требуется не только предельно высокая энергетическая сила излучения, но и длительная непрерывная работа лазера. В работе [1] в импульсно-периодической электроионизационной CO_2 -системе задающий генератор – усилитель была получена энергетическая сила излучения порядка нескольких тераватт на стерадиан. Дальнейшие успехи в этом направлении могут быть достигнуты при применении более коротковолновых нецепных электрохимических HF(DF)-лазеров.

До недавнего времени достижение больших энергий (мощностей) излучения нецепных HF(DF)-лазеров сдерживалось контрагированием объемного разряда. В работах [2, 3] эти трудности были преодолены за счет применения лазерных смесей, содержащих углеводороды, которые служили одновременно донорами H(D) и легко ионизируемыми присадками. Этому также способствовало использование схемы генератора импульсного напряжения (ГИН), обеспечивающей включение накачки после предварительного заполнения разрядного объема электронами проводимости. При этом скорость нарастания разрядного тока dI/dt составляла $(2-3) \cdot 10^{11}$ А/с.

Представляет несомненный интерес исследование нецепных HF(DF)-лазеров при накачках с $dI/dt \sim 10^{10}$ А/с, что позволит в случае успеха применять для создания этих лазеров хорошо отработанные системы накачки ТЕА CO_2 -лазеров, функционирующие в диапазоне длительностей импульсов накачки 0.2 – 1.0 мкс. Цель настоящей работы – нахождение оптимальных условий для достижения высоких выходных характеристик нецепного HF-лазера на тяжелых углеводородах.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились на установке, описанной в [4]. Схема эксперимента приведена на рис.1. Основой конструкции лазера служит аэродинамическая труба с замкнутым циклом прокачки лазерной смеси, в рабочей части которой размещена лазерная камера 1. Разрядный объем сформирован между электродами 2 (межэлектродное расстояние 45 мм, размер электрода 90×900 мм). В отличие от [4], начальная концентрация электронов в разрядном объеме создавалась за счет коронирования с поверхностей электродов при включении напряжения накачки.

ГИН 3 построен по одноступенчатой схеме Фитча, его коммутатором служит многоазорный импульсный разрядник 4. При использовании импульсного зарядного устройства 5 такая схема накачки работает в импульсно-периодическом режиме на частоте до 700 Гц. Окна 6 из NaCl для ввода-вывода излучения установлены под углом Брюстера к оси лазерной камеры.

В экспериментах применялись два типа резонаторов: плоский, состоящий из глухого медного зеркала 7 и пластины 8 из BaF_2 (ZnSe), или неустойчивый телескопиче-

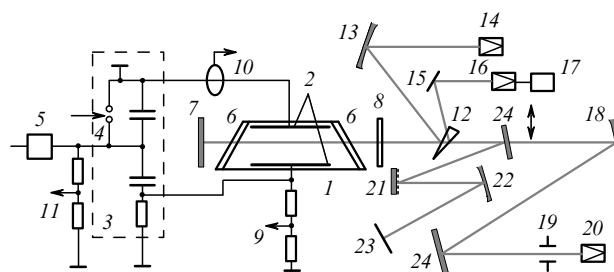


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
1 – лазерная камера; 2 – электроды; 3 – ГИН; 4 – многоазорный разрядник; 5 – импульсное зарядное устройство; 6 – окно под углом Брюстера; 7, 8 – зеркала резонатора; 9, 11 – измерительные делители напряжения; 10 – пояс Роговского; 12 – клин из NaCl; 13, 18, 22 – фокусирующие зеркала; 14, 20 – калориметры; 15 – диффузный экран; 16 – пироприемник; 17 – осциллограф; 19 – диафрагма; 21 – дифракционная решетка; 23 – термобумага; 24 – плоские зеркала.

*Государственный научно-исследовательский испытательный лазерный центр РФ «Радуга», Россия, 600030 Радужный Владимирской обл.

**Владимирский государственный университет, Россия, 600035 Владимир, ул. Горького, 87

ский резонатор (НТР) с увеличением $M = 2$ и диаметром выходной апертуры $d = 40$ мм. Средняя скорость потока лазерной смеси в импульсно-периодическом режиме поддерживалась равной 20 м/с.

В экспериментах проводились измерения разрядного тока и напряжения на электродах лазерной камеры, а также зарядного напряжения ГИНа. Излучение лазера при отражении от передней грани клина 12 направлялось на схему измерения энергии излучения, состоявшую из фокусирующего зеркала 13 и калориметра 14 типа ИМО-2Н. Излучение, отраженное от задней грани клина 12, направлялось в схему измерения формы импульса излучения, образованную диффузным экраном 15 и подключенным к осциллографу 17 пироприемником 16.

Для исключения помех от ГИНа пироприемник и осциллограф помещались в специальную экранированную камеру. Излучение, прошедшее клин 12, направлялось в схему измерения расходимости излучения, состоящую из фокусирующего зеркала 18 (фокусное расстояние 6 м), сменных калиброванных диафрагм 19, установленных в фокальной плоскости зеркала 18, и калориметра 20 типа ТПИ-2М, который размещался за сменными диафрагмами 19. Для регистрации спектра излучения HF-лазера вместо зеркала 18 устанавливалась зеркальная дифракционная решетка 21 с периодом штрихов 10 мкм; отраженное от нее излучение с помощью фокусирующего зеркала 22 направлялось на светочувствительную бумагу 23.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Исследования проводились в импульсном и импульсно-периодическом режимах при рабочем давлении лазерной смеси $p = 75$ Тор. Были исследованы лазерные смеси элегаза с техническим пропан-бутаном $SF_6 - (C_3H_8 + C_4H_{10})$ в сравнении со смесью $SF_6 - H_2$. Для данной установки оптимальным по энерговыкладу оказалось соотношение давлений компонентов 30 : 1.

Вначале в лазерной камере были установлены алюминиевые электроды и плоский резонатор. В смесях $SF_6 - H_2$ генерации получить не удалось во всех режимах из-за развивающегося электрического пробоя. На смеси $SF_6 - (C_3H_8 + C_4H_{10})$ объемный разряд горел в очень узком диапазоне зарядного напряжения ГИНа, не превышающем 1 кВ. При этом удельный энерговыход составил всего 0.7 Дж/л, а визуально было установлено, что свечение объемного разряда крайне неоднородно. Наиболее яркое свечение наблюдалось на краях электродов, с которых в большинстве случаев и развивался электрический пробой.

После замены металлического катода анизотропно-резистивным электродом (АРЭ) картина и параметры разряда кардинально изменились. Удельный энерговыход на смеси $SF_6 - (C_3H_8 + C_4H_{10})$ возрос в 5 раз, свечение объемного разряда стало однородным. В предпробойной фазе разряда из анода наблюдалось прорастание токовых нитей, с одной из которых и развивался пробой. На смеси $SF_6 - H_2$ удельный энерговыход не превышал 1 Дж/л. При установке НТР с $M = 2$ и диаметром выходной апертуры 40 мм удельный энерговыход возрос примерно на 25 % по сравнению с плоским резонатором такого же объема. Этот факт объясняется тем, что НТР с $M = 2$ близок к оптимальному резонатору для данного лазера. Кроме того, при замене в плоском резонаторе

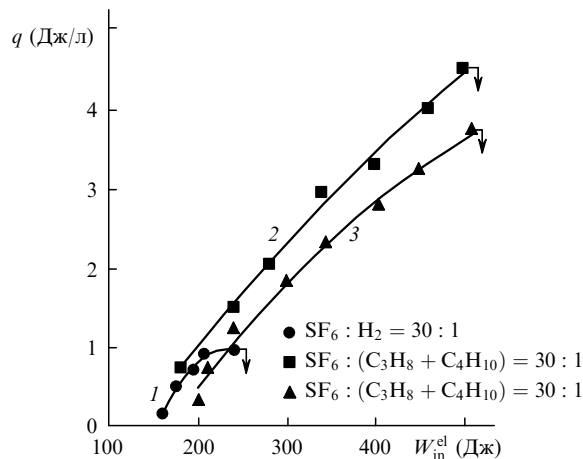


Рис.2. Зависимости удельной энергии излучения q от энерговыклада W_{in}^{el} для смеси $SF_6 - H_2$ с плоским резонатором с апертурой 45×90 мм (1), смеси $SF_6 - (C_3H_8 + C_4H_{10})$ с НТР с $M = 2$, $d = 40$ мм (2) и смеси $SF_6 - (C_3H_8 + C_4H_{10})$ с плоским резонатором с апертурой 45×90 мм (3); стрелками показан порог электрического пробоя.

выводного зеркала из BaF_2 зеркалом из $ZnSe$ удельные параметры излучения практически не изменялись.

На рис.2 приведены результаты измерений удельной энергии излучения в зависимости от энерговыклада, который принимался равным энергии, запасенной в ГИНе. Измерения параметров разряда и вычисление его энергии по формуле

$$W^{el} = \int_0^{\tau} U(t)I(t)dt$$

(где τ – длительность импульса накачки, $U(t)$ и $I(t)$ – текущие напряжение и ток разряда) позволили установить, что в разрядный объем вкладывалось не менее 65 % энергии, запасенной в ГИНе. Квазистационарная фаза разряда характеризуется отношением $E/p \sim 80 - 120$ В \times (см \cdot Тор) $^{-1}$.

На рис.3 приведены характерные осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда, зарегистрированные

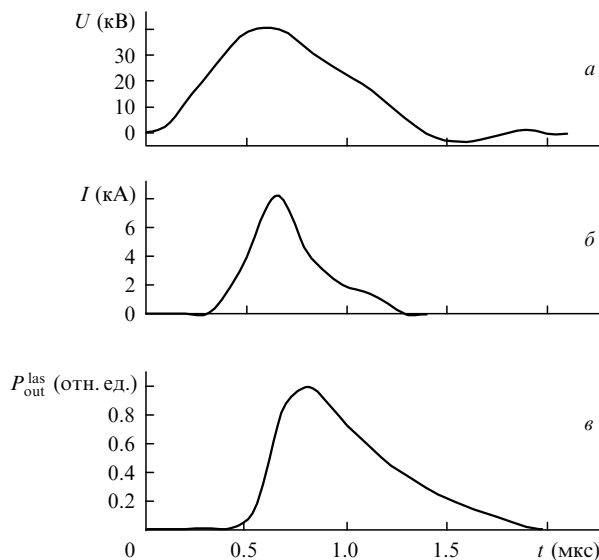


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке (а), тока разряда (б) и относительной мощности лазерного излучения (в).

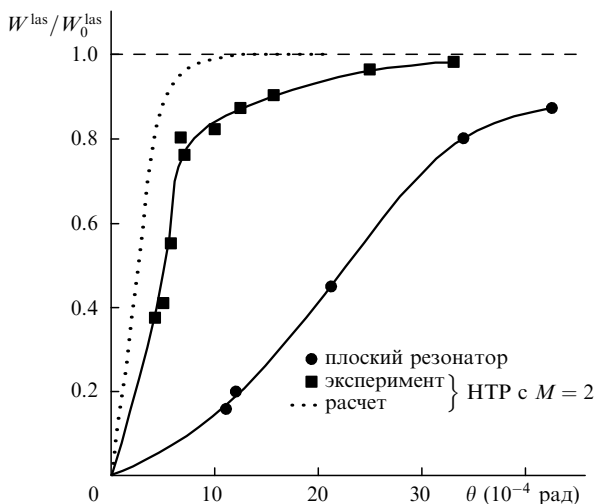


Рис.4. Нормированное энергетическое распределение излучения в зависимости от угла, охватываемого апертурной диафрагмой, при диаметре выходной апертуры 40 мм.

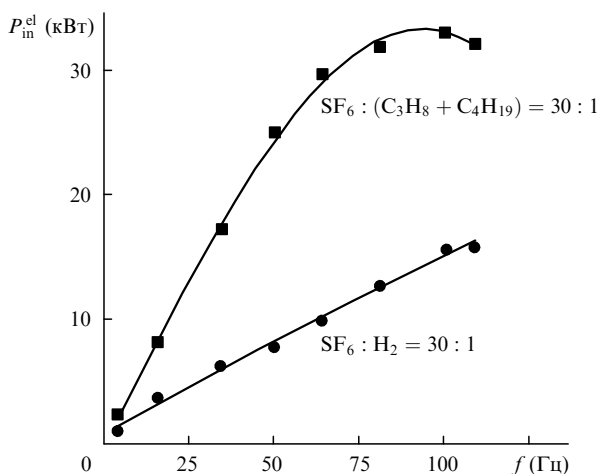


Рис.5. Зависимости вкладываемой мощности P_{in}^{el} от частоты следования импульсов f для смесей $SF_6 - (C_3H_8 + C_4H_{10})$ и $SF_6 - H_2$.

на электродах лазерной камеры, а также осциллограмма относительной мощности импульса лазерного излучения.

Эффективность АРЭ заключается в том, что он позволяет компенсировать отрицательное сопротивление разряда dU/dI в прикатодной области последовательно подключенным анизотропно-резистивным участком катода. При этом сопротивление части катода $R_c = rl/s$ (r , l , s – удельное сопротивление, длина и площадь части катода соответственно) должно превышать dU/dI . В нашем случае $r = 45$ Ом/см.

Сравнительные измерения расходимости излучения выполнялись методом калиброванных диафрагм [1] для двух схем резонатора (плоского и НТР с $M = 2$) при одинаковых диаметрах выходных апертур, равных 40 мм. Результаты измерения расходимости приведены на рис.4.

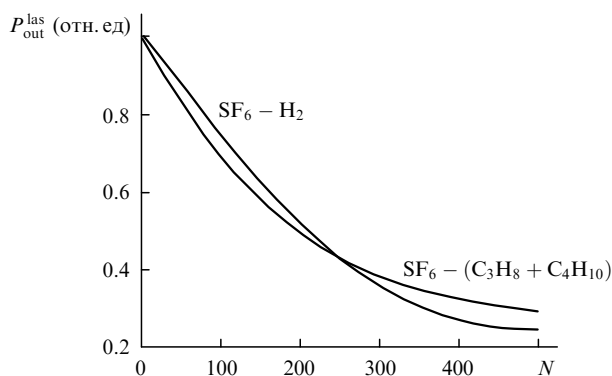


Рис.6. Зависимости мощности излучения HF-лазера от числа импульсов для смесей $SF_6 - (C_3H_8 + C_4H_{10})$ и $SF_6 - H_2$.

Для НТР расходимость θ составила $1.7\theta_{dif}$ и не зависела от энерговклада во всем диапазоне измерений. Незначительное отличие от дифракционного угла θ_{dif} объясняется неидеальностью используемых оптических элементов и неточностью юстировки резонатора. В случае плоского резонатора получена характерная для этого типа резонатора расходимость $\sim 10\theta_{dif}$.

На рис.5 приведены результаты исследований HF-лазера в импульсно-периодическом режиме. Максимум вкладываемой мощности достигался на частоте 90–100 Гц. Заметим, что работа HF-лазера в этом режиме подобна работе хорошо изученного TEA CO_2 -лазера.

Исследования в режиме длительной работы лазера при разных составах смесей показали (рис.6), что спад мощности излучения происходит, в основном, за счет релаксации возбужденных молекул HF, т. к. вкладываемая в разряд мощность остается постоянной вплоть до полного исчезновения генерации. Применение систем регенерации отработанных лазерных смесей, как это сделано, например, в [5], позволит стабилизировать мощность излучения лазера на требуемом уровне.

4. Заключение

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность достижения высоких выходных характеристик нецепных HF(DF)-лазеров. Дальнейшее повышение выходной мощности HF(DF)-лазеров возможно благодаря применению анизотропно-резистивного анода, а также увеличению разрядного объема до десятков и сотен литров.

1. Бабаев И.К., Бардаковский С.В., Блинов Н.А. и др. *Квантовая электроника*, **18**, 6 (1991).
2. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 213 (1997).
3. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 123 (1998).
4. Булаев В.Д., Видавский А.Э., Ковалев В.И., Куликов В.В. *Квантовая электроника*, **25**, 243 (1998).
5. Великанов С.Д. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 295 (1997).