

Электроразрядный DF-лазер с энергией в импульсе порядка 10 Дж

В.П.Борисов, Вал.В.Бурцев, С.Д.Великанов, С.Л.Воронов, В.В.Воронин,
А.Ф.Запольский, М.И.Золотов, Г.А.Кириллов, Г.М.Мищенко, А.М.Подалов,
В.Д.Селемир, В.Д.Урлин, Ю.Н.Фролов, В.П.Цибереv

Приводятся результаты детальных исследований импульсного DF-лазера на основе нецепной химической реакции фтора с дейтерием. Показано, что система электродов в виде лезвий позволяет организовать объемный самостоятельный разряд в разрядном промежутке высотой до 12 см. Получены зависимости энергии генерации от давления и состава рабочей смеси $SF_6 - D_2$, а также добротности резонатора. Зарегистрированы максимальная энергия генерации 10.5 Дж и технический КПД 2.2%. Показано, что расчетная модель хорошо описывает результаты экспериментов.

Ключевые слова: DF-лазер, нецепная реакция, электрический разряд.

Введение

В последнее время значительно возрос интерес к изучению DF-лазера с инициированием химической нецепной реакции свободными электронами, источником которых являются электрический разряд или электронный ускоритель [1–4]. Это обусловлено, в частности, возможностями использования такого лазера для экологического мониторинга атмосферы [5–7]. Его исходными компонентами обычно являются нетоксичные и неагрессивные SF_6 и D_2 или угледейтериды. Излучение лазера сосредоточено в спектральной области 3.6–4.1 мкм («окно прозрачности» атмосферы), в которой находятся полосы поглощения таких глобальных загрязнителей атмосферы, как углеводороды, SO_2 , окислы азота и др.

В настоящей работе приведены результаты детальных исследований лазера на основе нецепной химической реакции фтора с дейтерием с инициированием реакции электрическим разрядом.

1. Экспериментальная установка

В экспериментах исследовался импульсный электроразрядный лазер. В качестве системы формирования разряда использовались два электрода, выполненных в виде лезвий [8]. Вблизи острых кромок каждого лезвия происходит увеличение напряженности электрического поля, которая в соответствии с работой [9] может в несколько раз превышать среднюю напряженность вдоль разрядного промежутка. При этом улучшается эмиссия электронов и создаются условия, позволяющие обеспечить объемный разряд в достаточно больших разрядных промежутках и получить высокую эффективность лазера в целом. Длина электродов составляет 300 мм, ширина – 70 мм. Расстояние между электродами было выбрано равным 120 мм.

Электрический разряд между электродами формировался при подаче на них высоковольтных импульсов разрядной полярности от генераторов импульсных напряжений (ГИН), собранных по схеме Фитча. В состав каждого генератора Фитча входили два конденсатора КМК-100-0.05, коммутатор и разрядник-обостритель. Синхронизация коммутаторов и разрядников-обострителей обеспечивалась с помощью блочных наносекундных генераторов [10]. Рабочий объем установки ~ 2.5 л ограничивался окнами из CaF_2 . Оптический резонатор лазера состоял из плоских зеркал. Глухое зеркало резонатора имело коэффициент отражения $R_1 \approx 0.98$. Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора R_2 варьировался, но в большинстве экспериментов он составлял ~ 0.3.

Оптическая схема экспериментов приведена на рис.1. В качестве измерителей энергии лазерного излучения использовались калориметры ТПИ-Э. Излучение в ближней зоне фиксировалось термочувствительным экраном. Длительность импульса генерации регистрировалась фоторезистором СВОД на основе германия, легированного золотом. Для измерения расходимости излучения лазера использовался метод калиброванных диафрагм. Кроме

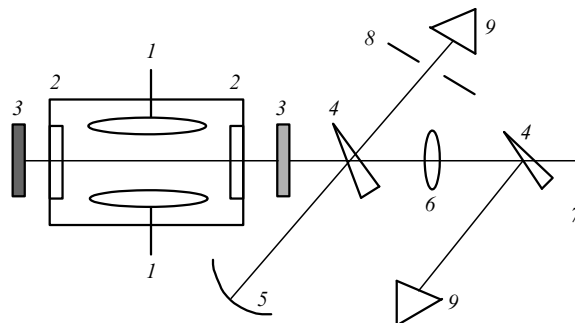


Рис.1. Оптическая схема экспериментов:

1 – электроды разрядной камеры; 2 – окна камеры; 3 – глухое и выходное зеркала оптического резонатора; 4 – клиновидные светоделительные пластины; 5 – фокусирующее зеркало; 6 – фокусирующая линза; 7 – термочувствительный экран; 8 – диафрагма; 9 – измеритель лазерной энергии.

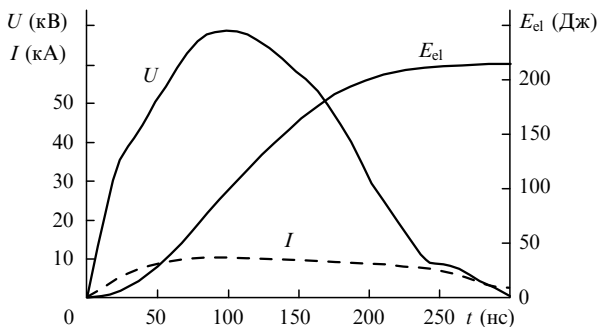


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на электродах, тока разряда и электрической энергии, вкладываемой в разряд.

параметров лазерного излучения, в экспериментах регистрировались электрические параметры разряда: напряжение на электродах и ток в электрическом контуре.

2. Результаты экспериментов

На рис.2 приведены типичные осциллограммы напряжения на электродах и тока разряда при зарядном напряжении $U_0 \approx 62$ кВ, давлении рабочей смеси $p \approx 0.09$ атм и соотношении компонентов лазерной смеси $SF_6 : D_2 = 10 : 1$. Как видно из осциллограмм, напряжение на каждом из электродов относительно земли в процессе работы установки достигает примерно ± 70 кВ, ток разряда – примерно 10 кА. Электрическая энергия E_{el} , вкладываемая в разряд, равна 215 Дж, что составляет $\sim 56\%$ энергии E_0 , запасаемой в конденсаторах ГИН. Максимальная амплитуда импульса напряжения в экспериментах равнялась ± 140 кВ, максимальная запасаемая энергия – 490 Дж.

В процессе исследований изучалось влияние на энергию излучения лазера добротности резонатора (коэффициента отражения выходного зеркала), соотношения компонентов лазерной смеси и давления рабочей смеси. Кроме того, проводились оценки оптической однородности активной среды лазера.

На рис.3 приведены зависимости энергии генерации E_g от коэффициента отражения выходного зеркала резонатора при различных зарядных напряжениях. Зависимости $E_g(R_2)$ имеют характерный вид со слабо выраженным максимумом при $R_2 \approx 0.3 - 0.4$. При $R_2 < 0.1$ энергия генерации резко уменьшается, тогда как при $R_2 > 0.6$ имеет место плавное ее уменьшение. В диапазоне $0.1 \leq R_2 \leq 0.6$ энергия генерации изменяется не более чем на 10%. Зависимость энергии генерации при изменении содержания дейтерия в рабочей смеси лазера ($p_{SF_6} = const$) (рис.4) имеет явно выраженный максимум при соотношении компонентов $SF_6 : D_2 = 10 : 1$.

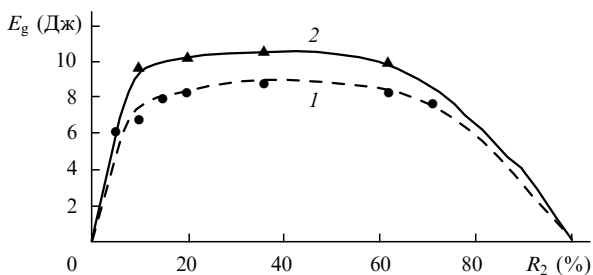


Рис.3. Зависимости энергии лазерного излучения от добротности резонатора при $U_0 = 62$ (1) и 72 кВ (2), $p = 0.1$ (1) и 0.11 ат (2), составе смеси $SF_6 : D_2 = 10 : 1$.

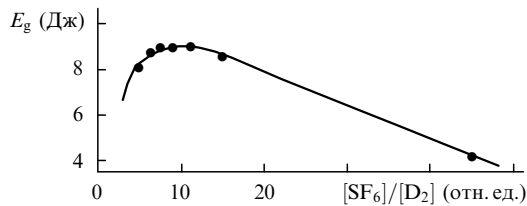


Рис.4. Зависимость энергии лазерного излучения от состава рабочей смеси при $U_0 = 62$ кВ, $R_2 = 0.33$, $p_{SF_6} = 0.09$ ат.

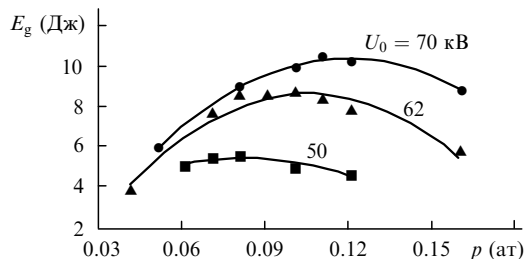


Рис.5. Зависимости энергии лазерного излучения от давления рабочей смеси при $R_2 = 0.36$, $SF_6 : D_2 = 10 : 1$ и различных зарядных напряжениях U_0 .

На рис.5 приведены зависимости энергии генерации E_g от давления рабочей смеси при вариации зарядного напряжения ГИН. Приведенные зависимости имеют традиционный для химических лазероразрядных лазеров вид (см., напр., [1]) с максимумом при оптимальном давлении рабочей смеси p_{opt} , соответствующем определенному зарядному напряжению.

В табл.1 приведены максимальная энергия генерации при различных напряжениях U_0 и оптимальных давлениях рабочей смеси p_{opt} , а также технический КПД лазерной установки $\eta \approx E_g/E_0$. Во всем исследованном диапазоне зарядных напряжений технический КПД составлял приблизительно 2.2%.

Для экспериментального определения оптической однородности рабочей среды в процессе разряда и генерации на вышеописанной установке использовались два метода. Во-первых, это интерференционный метод с фотоэлектрической регистрацией динамики интерференционных полос. Такой метод позволял получать информацию об изменении показателя преломления Δn по сдвигу полос. Постоянная времени регистрации составляла ~ 500 нс, максимальная чувствительность метода $\Delta n_{min} \approx 10^{-7}$. Зондировались различные участки разрядного промежутка: прикатодная, прианодная и периферийная области разрядного объема с разными величиной и направлением сдвига интерферирующих пучков. Эксперименты показали, что в течение 1–10 мкс после начала разряда оптические неоднородности Δn не превышали 10^{-7} . При базе измерений 0.5 см градиент показателя преломления составлял не более $2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$.

Во-вторых, оптические неоднородности приближенно рассчитывались по результатам измерения энергетической расходимости излучения. Энергия излучения в угле 2θ определялась с помощью калиброванных диа-

Табл.1. Характеристики лазерной установки.

U_0 (кВ)	p_{opt} (ат)	E_0 (Дж)	E_g (Дж)	η (%)
50	0.08	250	5.49	2.20
62	0.01	384	8.53	2.22
70	0.11	490	10.50	2.14

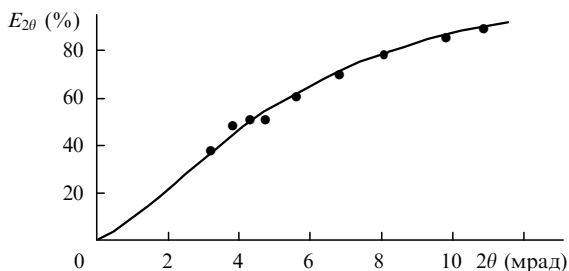


Рис.6. Угловое распределение энергии лазерного излучения.

фрагм, располагаемых в фокальном пятне. На рис.6 приведены результаты экспериментов.

Оценка изменения показателя преломления осуществлялась по формуле [11]

$$\Delta n = \frac{(2\theta)^2 - \alpha D/l}{8l_a/l} = 2.4 \cdot 10^{-6},$$

где $l_a = 300$ мм – длина активной среды лазера; $l = 700$ мм – расстояние между зеркалами оптического резонатора; $\alpha = 5 \cdot 10^{-5}$ рад – угол расстройки зеркал оптического резонатора; $D = 12$ см – расстояние между электродами. Оценка градиента показателя преломления $\Delta n/D$ дает $2 \cdot 10^{-7}$ см $^{-1}$.

Для обоих методов характерны близкие значения градиентов показателя преломления. На основании результатов экспериментов можно предполагать, что активная среда лазера имеет достаточно высокую оптическую однородность.

3. Сравнение результатов расчетов с экспериментом

Для расчета параметров излучения DF-лазера использовалась модель импульсного лазера [12], которая позволяет рассчитывать генерацию с учетом вращательной неравновесности.

При иницировании химического лазера электрическим разрядом могут наблюдаться значительные неоднородности как вдоль, так и поперек оптической оси лазера. Для учета влияния неоднородности иницирования вдоль оптической оси в модели [12] активная длина разбивается на необходимое число пространственных интервалов, на каждом из которых кинетика считается независимой. При учете неоднородности иницирования поперек оптической оси проводится ряд расчетов с разной мощностью иницирования, а потом находится интеграл по торцу лазера.

При анализе работы электроразрядного импульсного химического лазера необходимо иметь в виду, что условия иницирования могут заметно изменяться от опыта к опыту. Особенно это проявляется при изменении состава рабочей смеси. Оценка мощности иницирования проводилась из сравнения результатов расчетов и

Табл.2. Зависимость энергии генерации E_g от энергии E_0 , запасенной в ГИН.

U_0 (кВ)	E_0 (Дж)	E_{cl} (Дж)	ρ_{opt} (ат)	E_g (Дж)	E_c (Дж)
50	250	140	0.08	5.5	5.58
62	384	215	0.1	8.5	8.44
70	490	274	0.11	10.5	10.51

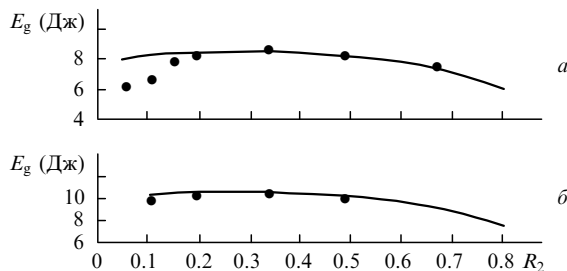


Рис.7. Экспериментальные (точки) и расчетные (кривые) зависимости энергии генерации от коэффициента отражения выходного зеркала при $U_0 = 62$ (а) и 70 кВ (б).

экспериментов для оптимальных условий работы лазера. При получении приведенных ниже результатов иницирование считалось неоднородным как вдоль оптической оси лазера (с перепадом по активной длине в 3 раза), так и в поперечном направлении (здесь также считалось, что мощность иницирования изменяется в 3 раза).

В табл.2 сравниваются результаты расчетов для оптимальных составов смесей при разных напряжениях на конденсаторах ГИН с результатами экспериментов, описанных выше (E_c – расчетная энергия генерации, состав смеси $SF_6 : D_2 = 10 : 1$). Наилучшее согласие с экспериментом наблюдается при средних энергозатратах на образование одного атома фтора в разряде $\epsilon_F \approx 10$ эВ. Видно, что при этом модель хорошо описывает изменение энергии генерации с ростом энергозапаса в ГИН и, соответственно, энерго вкладов в среду.

На рис.7 представлены зависимости лазерной энергии от коэффициента отражения выходного зеркала для двух зарядных напряжений. Расчетные энергии генерации при малых коэффициентах отражения больше экспериментальных. В оптимуме и при больших R_2 наблюдается неплохое согласие результатов расчетов и эксперимента.

Достаточно информативна зависимость выходной энергии лазера от содержания дейтерия в смеси, которая представлена на рис.8. Условия расчетов и экспериментов соответствуют напряжению на конденсаторах ГИН $U_0 = 62$ кВ. В этой серии экспериментов выходная энергия лазера была несколько выше, чем приведенная в табл.2, поэтому расчеты с неоднородным иницированием проводились в предположении, что в активном объеме поглощается 60 % энергии, запасенной в ГИН. Для сравнения приведена также расчетная зависимость, полученная при однородном иницировании (в этом случае считалось, что поглощается 54 % энергии, запасенной в ГИН). В обоих случаях $\epsilon_F = 10$ эВ.

Видно, что резкое изменение энергии генерации при малых давлениях дейтерия в смеси в заметной мере

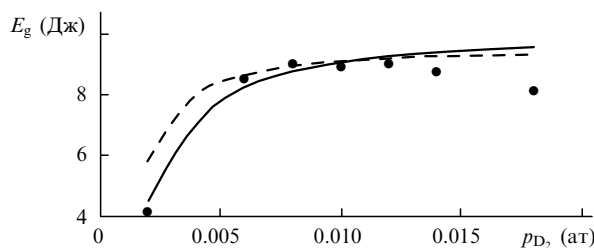


Рис.8. Экспериментальные (точки) и расчетные зависимости энергии генерации от содержания дейтерия в смеси с учетом однородного (штриховая кривая) и неоднородного (сплошная кривая) иницирования при $U_0 = 62$ кВ, $\rho_{SF_6} = 0.09$ ат.

обуславливается неоднородностью разряда. При относительно небольших энерговкладах в рабочую среду оптимальное соотношение компонентов смеси $SF_6:D_2 = (6-5):1$ (см., напр., [1]). Согласно результатам расчетов, при повышенных энерговкладах оптимальное содержание дейтерия несколько возрастает. Поэтому полученное в эксперименте уменьшение энергии генерации при давлениях $p_{D_2} > 0.012$ ат, по-видимому, связано со снижением эффективности инициирования разрядом в этой области.

Таким образом, модель хорошо описывает экспериментальные результаты для оптимальных условий работы лазера при средних энергозатратах на образование одного атома фтора в разряде $\varepsilon_F \approx 10$ эВ.

Заключение

В процессе экспериментов установлено, что:

- объемный разряд при напряжении на электродах ~ 160 кВ устойчиво формируется в системе электродов, выполненных в виде лезвий (длина электродов 300 мм, ширина 100 мм, расстояние между электродами 120 мм);
- существует определенный диапазон изменения коэффициента отражения выходного зеркала резонатора для получения максимальной энергии генерации;
- существуют оптимальные давления рабочей смеси для каждого зарядного напряжения, при которых энергия генерации максимальна;
- технический КПД лазера в импульсном режиме работы составляет $\sim 2.2\%$.

По-видимому, мы еще не в полной мере реализовали возможности разрядной системы, поскольку использовали самоподдерживающийся разряд. Вероятно, предварительная ионизация позволит получить более высокие энергетические параметры лазера и создать более выгодные условия для достижения малой расходимости излучения.

1. Великанов С.Д., Запольский А.Ф., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 11 (1997).
 2. Lacour B., Gagnol C., Prigent P., Puech V. *Proc.SPIE*, **3574**, 334 (1998).
 3. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Oreshkin V.F. *Proc.SPIE*, **3574**, 374 (1998).
 4. Орловский В.М., Пономаренко А.Г., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Хапов В.И. *ЖТФ*, **69**, 76 (1999).
 5. Великанов С.Д., Елутин А.С., Кудряшов Е.А., Пегоев И.Н., Синьков С.Н., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **24**, 279 (1997).
 6. Великанов С.Д., Елутин А.С., Пегоев И.Н., Синьков С.Н., Фролов Ю.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 181 (1998).
 7. O'Connor S.J., Walmsley H.L., Pasley H. *Proc.SPIE*, **3493**, 255 (1998).
 8. Великанов С.Д., Евдокимов П.А., Запольский А.Ф., Ковалев Е.В., Пегоев И.Н. *Квантовая электроника*, **28**, 901 (1998).
 9. Бугаев С.П., Кошкарев А.В., Манилов В.И., Пайгин В.Н. *ПТЭ*, № 2, 160 (1974).
 10. Kudasov B.G., Pavlov S.S., Tananakin V.A., Tchiberev V.P., Voronin V.V., Voronov S.L. *XI IEEE Intern. Pulsed Power Conf.* (Baltimore, USA, 1997, v.2, p.1572).
 11. Кириллов Г.А., Кормер С.Б., Кочемасов Г.Г., Куликов С.М., Муругов В.М., Николаев В.Д., Сухарев С.А., Урлин В.Д. *Квантовая электроника*, **2**, 666 (1975).
 12. Кондрашенко А.В., Мищенко Г.М., Севастьянова Т.Г., Урлин В.Д. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики*, № 3, 64 (1988).
- V.P.Borisov, Val.V.Burtzev, S.D.Velikanov, S.L.Voronov, V.V.Voronin, A.F.Zapolskii, M.I.Zolotov, G.A.Kirillov, G.M.Mishchenko, A.M.Podavalov, V.D.Selemer, V.D.Urlin, Yu.N.Frolov, V.P.Tsiberev. **Electric-discharge DF laser with a pulse energy of about 10 J.**

An account is made of a comprehensive study of a pulsed DF laser based on a nonchain fluorine-deuterium chemical reaction. It is shown that a system of knife-shaped electrodes makes it possible to realise a volume self-sustained discharge in a discharge gap up to 12 cm in height. The output laser energy was studied in relation to the pressure and the composition of the SF_6-D_2 mixture and also to the cavity Q -factor. A maximum output energy of 10.5 J and a technical efficiency of 2.2 % were recorded. The simulation model was shown to represent the experimental results adequately.