

Импульсный индукционный HF-лазер*

А.М.Ражев, Д.С.Чуркин, Е.С.Каргапольцев, С.В.Демчук

Приведены результаты экспериментальных исследований зависимостей временных, спектральных и пространственных характеристик генерации индукционного HF-лазера от условий накачки. В качестве активной среды использовались газовые смеси $H_2 - F_2(NF_3 \text{ или } SF_6)$ и $He(Ne) - H_2 - F_2(NF_3 \text{ или } SF_6)$. Длительность импульсов генерации на пиковую достигала 0.42 мкс. Это соответствовало импульсной мощности 45 кВт. Впервые исследован спектр излучения индукционного HF-лазера, который состоял из семи групп полос с центрами вблизи длин волн 2732, 2763, 2798, 2835, 2873, 2893 и 2913 нм. Сечение лазерного пучка представляло собой кольцо диаметром около 20 мм и шириной около 5 мм. При работе в импульсно-периодическом режиме лазерные параметры были достаточно стабильны. Нестабильность амплитуды световых импульсов не превышала 5%–6%.

Ключевые слова: импульсный цилиндрический индукционный разряд, HF-лазер, спектр генерации, стабильность работы лазера, кольцевая форма сечения пучка.

1. Введение

В настоящее время импульсные нецепные HF- и DF-лазеры с иницированием химических реакций электрическим разрядом представляют несомненный научный интерес и находят широкое применение [1–12]. Излучение данных лазеров успешно используется в различных лидарных системах для исследования атмосферы, обнаружения и измерения концентрации водяного пара, а также ряда примесных газов и аэрозолей [4–8]. Для подобных целей обычно применяются HF (чаще DF-)лазеры с энергией генерации 0.5 – 200 мДж, импульсной мощностью в десятки–сотни киловатт и частотой следования импульсов от долей герца до нескольких герц [4, 5]. Кроме того, важными характеристиками излучения HF- и DF-лазеров с практической точки зрения являются спектральный состав и возможность плавной перестройки частоты. При этом требуется обеспечить стабильность работы лазеров в импульсно-периодическом режиме – энергия генерации должна мало изменяться от импульса к импульсу.

* Доложена на Пятом российско-китайском симпозиуме по лазерной физике и фотонике (RCWLP&P, Новосибирск, 26–30 августа 2015 г.).

А.М.Ражев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск, просп. К.Маркса, 20; e-mail: razhev@laser.nsc.ru

Д.С.Чуркин, С.В.Демчук. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: churkin@laser.nsc.ru, 79130152397@yandex.ru

Е.С.Каргапольцев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: djohn797@mail.ru

Поступила в редакцию 7 декабря 2015 г., после доработки – 15 января 2016 г.

В работе [13] мы впервые продемонстрировали возможность создания химических лазеров с инициацией импульсным индукционным разрядом. В этой работе был описан индукционный HF-лазер, работающий на смеси $H_2 - NF_3(SF_6)$ или $He(Ne) - H_2 - NF_3(SF_6)$. Вместе с тем, с учетом вышеупомянутых требований к лазерному излучению, необходимо проведение исследований зависимости спектральных, временных и пространственных характеристик генерации индукционного HF-лазера от условий накачки. Это и являлось целью настоящей работы.

2. Экспериментальная установка

В настоящей работе использовалась импульсная высоковольтная система формирования индукционного разряда в газах, аналогичная описанной в [13]. Данная система возбуждения отличается простотой конструкции и позволяет добиться стабильной работы индукционного лазера. В наших экспериментах при работе HF-лазера в импульсно-периодическом режиме с частотой в несколько герц на стабильность амплитуды световых импульсов не превышала 5%–6%.

В экспериментах применялась керамическая разрядная трубка с внешним диаметром 25 мм и длиной 800 мм. Внутренний диаметр трубки был равен 20 мм. Через газовую систему в трубку напускалась газовая смесь при давлениях 0.1–100 Тор. Поскольку конструкция излучателя не предполагала наличия балластного объема, в экспериментах замена отработавшей смеси в излучателе осуществлялась ее продольной прокачкой со скоростью 0.3–0.5 л/мин. У торцов трубки располагались юстировочные узлы, в которых размещались герметизирующие плоскопараллельные окна, изготовленные из MgF_2 . Оптический резонатор был образован плоскими диэлектрическими зеркалами: задним с коэффициентом отражения, близким к 100% в области спектра 2.5–3.5 мкм, и выходным, коэффициент отражения которого изменялся в ходе экспериментов. Индуктор состоял из нескольких отдельных

секций, выполненных из намотанного на лазерную трубку многожильного провода ПВ6-3 сечением 10 мм^2 и включенных параллельно. Общая длина соленоида составляла 550 – 600 мм. Эту же величину мы считали активной длиной лазера.

Для исследования энергетических характеристик лазерного излучения применялся пирозлектрический измеритель энергии PE-50BV (Ophir Optronics) с дисплеем Nova (Ophir Optronics). Временные характеристики генерации исследовались с помощью полупроводникового диода ФД-511-2 с азотным охлаждением и осциллографа Tektronix TDS 2024. Изучение спектрального состава лазерного излучения проводилось с использованием монохроматора МДР-204 с фотоприемным устройством ФПУ-ФС. Форма сечения лазерного пучка регистрировалась цифровой камерой Pyrocam (Ophir Optronics).

3. Результаты и их обсуждение

Активной средой индукционного HF-лазера в экспериментах служили газовые смеси водорода с фторсодержащими соединениями (F_2 , NF_3 или SF_6). В качестве буферных газов применялись гелий и неон. Наибольшая энергия импульса генерации (6.3 мДж) в данном излучателе достигалась при использовании в качестве донора фтора молекул NF_3 в смеси состава $\text{H}_2:\text{NF}_3 = 1:4$. Разбавление этой смеси гелием или неоном позволяло увеличить энергию в 1.5 раза. Оптимальная объемная доля буферного газа в рабочей смеси была одинаковой для He и Ne и составляла около 90%, при этом использование гелия давало возможность получать большую энергию генерации. Зарядное напряжение U_{ch} в экспериментах равнялось 25 кВ. При его увеличении до 31 кВ (дальнейшее увеличение было ограничено возможностями системы питания) энергия генерации увеличивалась практически линейно и достигала 19 мДж (рис.1). В последующих экспериментах использовались двухкомпонентные смеси состава $\text{H}_2:\text{NF}_3 = 1:4$ или трехкомпонентные смеси состава He: $\text{H}_2:\text{NF}_3 = 45:1:4$.

Индукционный HF-лазер мог работать в импульсно-периодическом режиме с частотой до 3 Гц. В таком режиме энергия импульса была в 2 – 2.5 раза меньше энергии одиночных импульсов. Можно предположить, что этот факт напрямую связан с недостаточной скоростью обмена смеси в лазерном излучателе, изменение конструкции

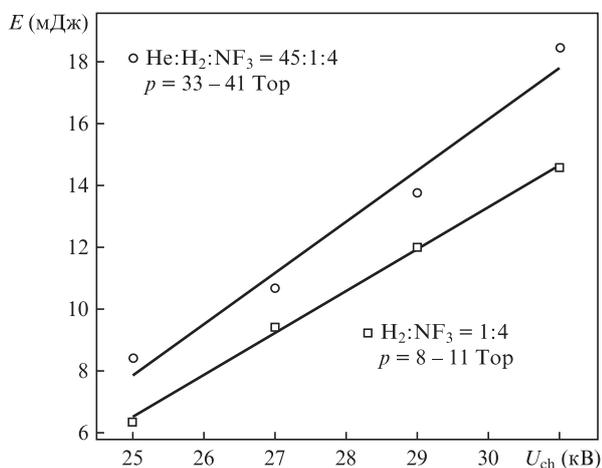


Рис.1. Зависимости энергии генерации E от зарядного напряжения U_{ch} индукционного HF-лазера для двух- и трехкомпонентной смесей.

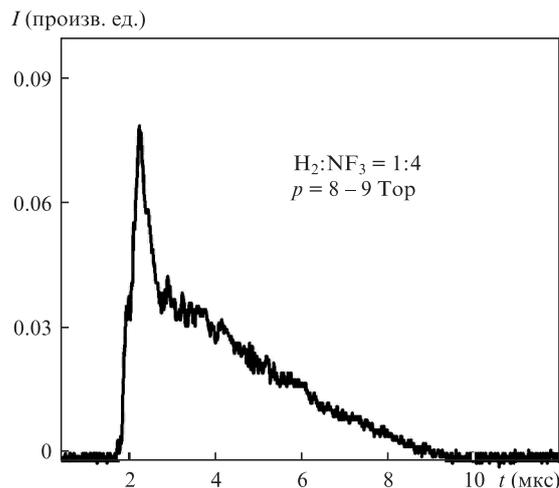


Рис.2. Осциллограмма импульса генерации индукционного HF-лазера. Зарядное напряжение $U_{\text{ch}} = 25 \text{ кВ}$.

которого для повышения скорости прокачки газов, в перспективе позволит увеличить частоту следования импульсов до десятков герц без уменьшения их энергии. Также экспериментально было обнаружено, что в импульсно-периодическом режиме нестабильность амплитуды световых импульсов не превышала 5% – 6%.

Были проведены исследования формы и длительности импульсов генерации HF-лазера с накачкой импульсным индукционным разрядом. Осциллограмма импульса приведена на рис.2. Его длительность вблизи основания достигала 7 мкс, а на полувысоте – 0.42 мкс и не изменялась при увеличении зарядного напряжения. Таким образом, можно утверждать, что при максимальной достигнутой энергии генерации 19 мДж на смеси He: $\text{H}_2:\text{NF}_3 = 45:1:4$ импульсная мощность излучения составляла 45 кВт.

Впервые был исследован спектральный состав излучения индукционного HF-лазера. Спектр регистрировался в области 2600 – 3500 нм. Было обнаружено, что спектр генерации лежит в области 2730–2910 нм и состоит из семи групп полос с центрами вблизи длин волн $\lambda = 2732, 2763, 2798, 2835, 2873, 2893$ и 2913 нм (рис.3). Наибольшую интенсивность имели три группы в диапазоне 2760–2840 нм. Состав спектра оставался практически неизменным при замене двухкомпонентной смеси $\text{H}_2:\text{NF}_3 = 1:4$ трехкомпонентной смесью He: $\text{H}_2:\text{NF}_3 = 45:1:4$, происходило только незначительное перераспределение интенсивностей между отдельными группами полос. Такая структура спектра излучения индукционного HF-лазера позволяет перестраивать частоту генерации между разными группами (в первую очередь в области 2760–2840 нм).

Анализ литературных данных [9–12] показывает, что спектры генерации HF- и DF-лазеров с инициацией электрическим разрядом обычно состоят из нескольких линий, соответствующих различным колебательно-вращательным переходам молекул HF и DF [9, 10]. В сравнении с ними спектры генерации цепных и газодинамических HF/DF-лазеров, как правило, содержат большее число линий, расположенных близко друг к другу, и могут сильно изменяться в зависимости от состава и давления активной среды [11, 12].

Поскольку в нашем случае спектр генерации состоял из отдельных групп полос, что является нетипичным для HF-лазеров, планируются дополнительные исследования,

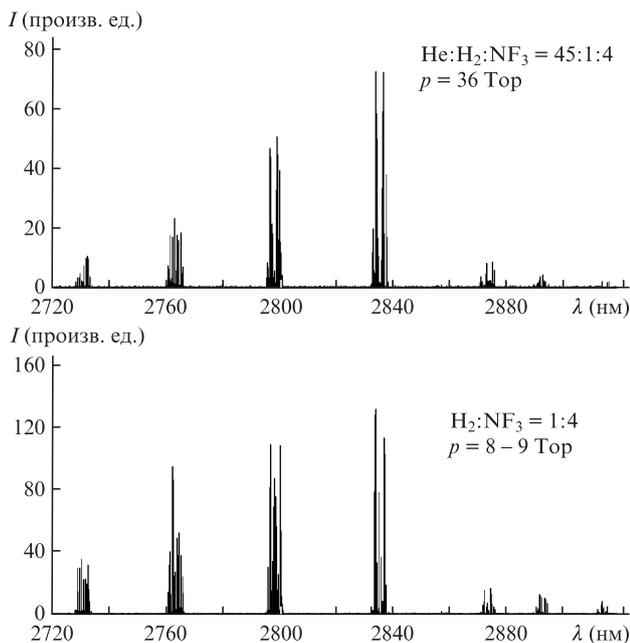


Рис.3. Спектр генерации индукционного HF-лазера. Зарядное напряжение $U_{ch} = 25$ кВ.

направленные на уточнение детальной структуры каждой группы, однако в настоящей работе эти исследования не проводились.

Исследовались пространственные характеристики лазерного излучения. На рис.4 приведен профиль пучка индукционного HF-лазера. Поскольку в наших экспериментах активная среда представляла собой полый цилиндр, сечение лазерного пучка имело форму кольца. Его внешний диаметр был близок к внутреннему диаметру лазерной трубки (20 мм), а ширина составляла около 5 мм. В

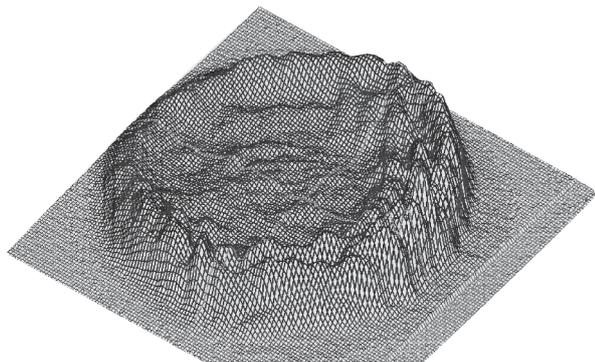


Рис.4. Профиль пучка генерации индукционного HF-лазера. Зарядное напряжение $U_{ch} = 25$ кВ, смесь He:H₂:NF₃ = 45:1:4.

настоящей работе не ставилась задача изучения модового состава излучения, однако анализ профиля лазерного пучка позволяет предположить наличие многомодового режима генерации. Возможно, это связано с тем, что в наших экспериментах использовался резонатор типа открытого интерферометра Фабри–Перо с плоскими зеркалами. Детальное изучение модового состава излучения, а также возможность работы индукционного HF-лазера в одномодовом режиме является задачей будущих исследований.

4. Заключение

В настоящей работе проведено исследование зависимостей временных, спектральных и пространственных характеристик генерации индукционного HF-лазера от условий накачки. В качестве активной среды использовались смеси водорода с F₂, NF₃ и SF₆, а в качестве буферных газов – гелий и неон. Получена максимальная энергия генерации 19 мДж на смеси He:H₂:NF₃ = 45:1:4 при давлении 41 Тор. Длительность импульсов генерации на полувисоте достигала 0.42 мкс, что соответствовало импульсной мощности 45 кВт. Форма и длительность импульса слабо зависели от условий накачки. Все лазерное излучение было сосредоточено в области 2730–2910 нм и состояло из семи групп полос вблизи $\lambda = 2732, 2763, 2798, 2835, 2873, 2893$ и 2913 нм. Спектральный состав практически не зависел от состава активной среды, изменялось только соотношение интенсивностей отдельных компонент. Сечение лазерного пучка представляло собой кольцо диаметром около 20 мм и шириной около 5 мм. Лазер стабильно работал в импульсно-периодическом режиме. Нестабильность амплитуды световых импульсов не превышала 5%–6%.

1. Булаев В.Д. и др. *Квантовая электроника*, **40** (7), 615 (2010).
2. Peng Ruan et al. *Opt. Express*, **20** (27), 28912 (2012).
3. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Панченко Н.А. *Оптика атмосферы и океана*, **27** (4), 341 (2014).
4. Agroskin V.Y. et al. *Appl. Phys. B*, **81** (8), 1149 (2005).
5. Romanovskii O.A. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, **17** (2), 131 (2008).
6. Васильев Б.И., Маннун У.М. *Квантовая электроника*, **36** (9), 801 (2006).
7. Левин В.А., Сорокин А.А., Старик А.М. *ЖТФ*, **61** (3), 41 (1991).
8. Sabatini R., Richardson M. *Cent. Eur. J. Eng.*, **3** (1), 11 (2013).
9. Панченко А.Н. и др. *Квантовая электроника*, **33** (5), 401 (2003).
10. Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34** (4), 320 (2004).
11. Азаров М.А. и др. *Квантовая электроника*, **30** (1), 30 (2000).
12. Азаров М.А. и др. *Квантовая электроника*, **33** (11), 949 (2003).
13. Razhev A.M., Churkin D.S., Kargapol'tsev E.S. *Laser Phys. Lett.*, **7** (10), 075002 (2013).