

Индукционный HF-лазер

А.М. Ражев^{1,2}, Д.С. Чуркин^{1,3}, Е.С. Каргапольцев^{1*}

¹Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3

²Новосибирский государственный технический университет

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

³Новосибирский государственный университет

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Поступила в редакцию 11.12.2015 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости энергетических, временных, спектральных и пространственных характеристик генерации индукционного HF-лазера от условий накачки. В качестве активной среды использовалась смесь водорода с F_2 , NF_3 и SF_6 , а также их смесями с гелием или неоном. Получена максимальная энергия генерации 19 мДж в смеси $He : H_2 : NF_3 - 45 : 1 : 4$ при давлении 42 торр. Длительность импульсов генерации на полувысоте достигала 0,42 мкс, что соответствовало импульсной мощности 45 кВт. Впервые исследован спектральный состав генерации индукционного HF-лазера. Спектр лазерного излучения состоял из семи групп полос вблизи 2732, 2763, 2798, 2835, 2873, 2893 и 2913 нм. Форма пятна генерации представляла собой кольцо диаметром около 2 см и шириной 0,4–0,5 см. Лазер имел высокую стабильность при работе в импульсно-периодическом режиме. Величина отклонения амплитуды световых импульсов не превышала 5–6%.

Ключевые слова: импульсный, цилиндрический, индукционный разряды, HF-лазер, спектр генерации, высокая стабильность работы лазера, кольцевая форма пучка; pulsed, cylindrical, inductive discharge, HF laser, generation spectrum, high laser operation stability, ring laser beam.

Введение

На сегодняшний день химические лазеры, в особенности HF- и DF-лазеры, имеют большое количество научных и практических применений. Излучение данных лазеров успешно используется в различных технологических процессах, в лидарных системах. Отдельный интерес представляет применение излучения HF-лазера для исследования атмосферы – обнаружения и измерения концентрации водяного пара, а также ряда примесных газов и аэрозолей [1–3].

Исследованию химических HF- и DF-лазеров посвящено довольно большое количество публикаций, среди которых следует выделить работы по созданию электроразрядных HF- и DF-лазеров [4–6]. В этом случае в качестве компонент активной среды используются, как правило, химически инертные доноры фтора (например, SF_6 или NF_3), а инициирование химических реакций происходит в результате протекания электрического разряда. Такие лазеры обычно называют нецепными. Энергия генерации таких лазеров может достигать нескольких джоулей, а электрический КПД – 4% и более.

Однако, несмотря на высокие значения энергии и КПД химических лазеров, иницируемых электрическим разрядом, существуют определенные проблемы, ограничивающие их практическое применение. Прежде всего, это трудности создания объемных однородных разрядов в газовых смесях, содержащих электроотрицательные газы. Основной причиной этого является неэффективность использования предварительной УФ-ионизации разрядного промежутка вследствие поглощения УФ-фотонов молекулами этих газов. В результате неустойчивости разрядов амплитуда генерации имеет высокую нестабильность от импульса к импульсу, наблюдаются повышенная эрозия электродов, загрязнение газовой смеси и оптических элементов ее продуктами. В связи с этим целесообразно рассмотреть вопрос о поиске альтернативных способов инициирования химических лазеров.

Одним из таких способов является инициирование химических лазеров импульсным индукционным разрядом. Ранее в своих экспериментах мы показали возможность возбуждения газовых лазеров импульсным индукционным разрядом и получения генерации на электронных переходах атомов и молекул, а также на колебательно-вращательных переходах молекул. В этих экспериментах впервые были созданы импульсные индукционные лазеры, излучающие в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра [7–10]. Импульсный индукционный

* Александр Михайлович Ражев (razhev@laser.nsc.ru); Дмитрий Сергеевич Чуркин (churkin@laser.nsc.ru); Евгений Сергеевич Каргапольцев (djohn797@mail.ru).

разряд как новый альтернативный метод возбуждения газовых лазеров был использован и для накачки химического HF-лазера. В работе [11] была продемонстрирована возможность получения лазерной генерации на колебательно-вращательных переходах молекул HF при инициации реакций импульсным индукционным разрядом. В то же время для практических применений важными характеристиками являются спектральный состав излучения, его пространственные характеристики, а также возможность обеспечить стабильную работу лазера в импульсно-периодическом режиме. Исследование зависимости вышеперечисленных характеристик от условий накачки и является целью данной работы.

Экспериментальная установка

На рис. 1 показана электрическая схема высоковольтной системы возбуждения, разработанной нами на основе хорошо известной схемы Блюмляйна. Схема включала в себя две емкости C_1 и C_2 , заряжаемые от импульсного источника питания (модель ALE 152A фирмы Lambda EMI) до напряжения $U_3 = 20\text{--}35$ кВ, что соответствовало запасаемой энергии 17–50 Дж. В качестве высоковольтного коммутатора ТНУ использовался тиратрон модели ТПИ1-10к/50. Рассматриваемая система возбуждения отличается простотой конструкции и позволяет добиться стабильной работы лазера. В наших экспериментах при работе лазера в импульсно-периодическом режиме с частотой несколько герц величина отклонения амплитуды световых импульсов не превышала 5–6%.

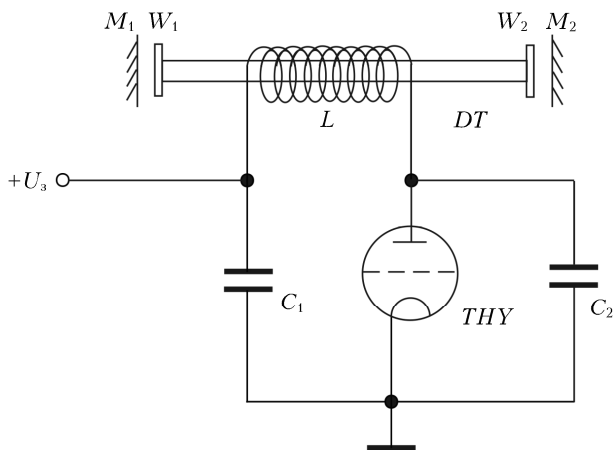


Рис. 1. Электрическая схема системы возбуждения: C_1 и C_2 – емкости; ТНУ – тиратрон ТПИ1-10к/50; DT – разрядная трубка; W_1 и W_2 – выходные окна из MgF_2 ; M_1 и M_2 – диэлектрические зеркала; L – индуктор

Для экспериментов использовалась керамическая разрядная трубка DT (рис. 1) с внешним диаметром 2,5 см. От газовой системы в трубку напускалась газовая смесь в диапазоне давлений от 0,1 до 100 торр. В ходе экспериментов осуществлялась продольная прокачка газов. По торцам трубки перпендикулярно к ним располагались юстировочные узлы, в которых размещались герметизирующие плоскопараллельные окна W_1 и W_2 , изготовленные из MgF_2 . Оптиче-

ский резонатор был образован плоскими диэлектрическими зеркалами M_1 и M_2 . Зеркало M_1 с коэффициентом отражения, близким к 100%, в области спектра 2500–3500 нм использовалось как заднее, коэффициент отражения переднего зеркала M_2 изменялся в ходе экспериментов. Индуктор L представлял собой соленоид, состоящий из нескольких отдельных секций, намотанных многожильным проводом ПВ6-3 сечением 10 мм². Все секции были соединены между собой параллельно. Общая длина соленоида составляла 55–60 см. Эту же величину мы считали активной длиной. При протекании переменного тока по соленоиду возникала магнитная индукция, формировавшая вихревое электрическое поле. В результате в газе возникал пробой и развивался импульсный индукционный разряд. Форма создаваемого в такой схеме индукционного разряда была в виде полого цилиндра, что обуславливало форму пятна лазерной генерации в виде кольца.

Для исследования энергетических характеристик лазерного излучения использовался пироэлектрический измеритель энергии Ophir Optronics PE-50BB с дисплеем Ophir Optronics Nova. Временные характеристики генерации исследовались при помощи полупроводникового диода ФД-511-2 с азотным охлаждением и осциллографа TektronixTDS 2024. Изучение спектрального состава лазерного излучения производилось с использованием монохроматора МДР-204 с фотоприемным устройством ФПУ-ФС. Форма лазерного пучка исследовалась при помощи цифровой камеры Pygocam фирмы Ophir Optronics.

Результаты и обсуждение

В экспериментах в качестве активной среды индукционного HF-лазера использовались газовые смеси водорода с фторсодержащими соединениями (F_2 , NF_3 или SF_6). В этих экспериментах наибольшая энергия генерации 6,3 мДж достигалась в смеси $\text{H}_2:\text{NF}_3=1:4$ при давлении 8 торр. При этом увеличение содержания NF_3 в рабочей смеси с $\text{H}_2:\text{NF}_3=1:3$ до $\text{H}_2:\text{NF}_3=1:5$ приводило к весьма незначительному изменению оптимального давления $P_{\text{опт}}$ для каждого из составов – с 7 до 9 торр. Дальнейшее увеличение содержания NF_3 в смеси приводило к резкому снижению энергии и дальнейшему срыву генерации. Замена NF_3 элегазом приводила к некоторому снижению энергии генерации (до 5 мДж) при давлении 10–12 торр. В экспериментах при увеличении содержания SF_6 в смеси оптимальное давление менялось довольно сильно – с 16–17 торр при соотношении $\text{H}_2:\text{SF}_6=1:3$ до 9–10 при соотношении $\text{H}_2:\text{SF}_6=1:5$. При этом оптимальным соотношением $\text{H}_2:\text{SF}_6$ также являлось 1:4, как и в случае с NF_3 . При использовании F_2 лазерная генерация не была получена, вероятно, из-за образования HF уже в баллоне во время приготовления рабочей смеси. Таким образом, поскольку для всех условий возбуждения максимальная энергия достигалась в смеси водорода и NF_3 , дальнейшие эксперименты проводились только с этими компонентами.

Исследовалось влияние добавок буферных газов к смеси $H_2:NF_3-1:4$ в разных пропорциях на энергию генерации индукционного HF-лазера. В качестве буферных газов использовались He и Ne. Результаты этих экспериментов показали, что в целом характер зависимости энергии генерации от процентного содержания буферного газа приблизительно одинаков для He и Ne. Оба этих газа дают максимальное улучшение энергетических характеристик лазера при объемной доле в рабочей смеси около 90%. Однако использование в качестве буферного газа He позволяет получить энергию генерации 9,6 мДж, что немного больше, чем при использовании газа Ne, когда энергия генерации не превышала 9 мДж. Зарядное напряжение в этих экспериментах составляло 25 кВ. При увеличении зарядного напряжения до 31 кВ (дальнейшее увеличение было ограничено возможностями системы питания) энергия генерации также увеличивалась и достигала величины 19 мДж. Оптимальное давление смеси $He:H_2:NF_3-45:1:4$ также увеличивалось с 36 торр при $U_3 = 25$ кВ до 42 торр при $U_3 = 31$ кВ.

Индукционный HF-лазер мог работать в импульсно-периодическом режиме с частотой до нескольких герц. При таком режиме энергия генерации оказывалась несколько меньше, чем в одиночных импульсах, однако при этом лазер имел достаточно высокую стабильность работы. Величина отклонения амплитуды световых импульсов не превышала 5–6%.

Исследования временных характеристик генерации HF-лазера с накачкой импульсным индукционным разрядом проводились с помощью полупроводникового фотодиода. Результаты экспериментов показали, что оптический импульс представляет собой пик с резким передним фронтом и плавным задним (рис. 2). Длительность оптического импульса вблизи основания составляла 5 мкс, а на полувысоте — 0,42 мкс и мало изменялась при увеличении зарядного напряжения. Таким образом, можно утверждать, что при максимально достигнутой энергии генерации 19 мДж в смеси $He:H_2:NF_3-45:1:4$ импульсная мощность излучения составляла 45 кВт.

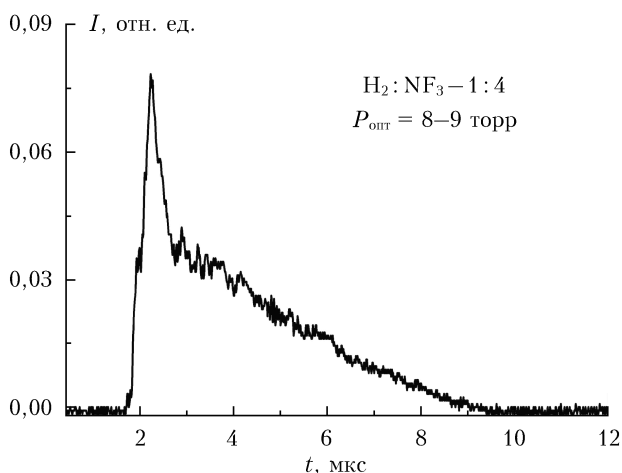


Рис. 2. Оциллограмма импульса генерации индукционного HF-лазера. Смесь $H_2:NF_3-1:4$ при давлении 8–9 торр и зарядном напряжении $U_3 = 25$ кВ

Исследования спектральных характеристик лазерной генерации проводились с использованием монохроматора МДР-204. Впервые были получены спектры генерации HF-лазера с накачкой импульсным индукционным разрядом. Исследования проводились для двух- и трехкомпонентных смесей. На рис. 3 представлены спектры излучения. В обоих случаях спектр генерации лежал в области 2730–2910 нм и состоял из семи групп полос вблизи 2732, 2763, 2798, 2835, 2873, 2893 и 2913 нм. Наибольшую интенсивность в обоих спектрах имели три группы в области 2760–2840 нм.

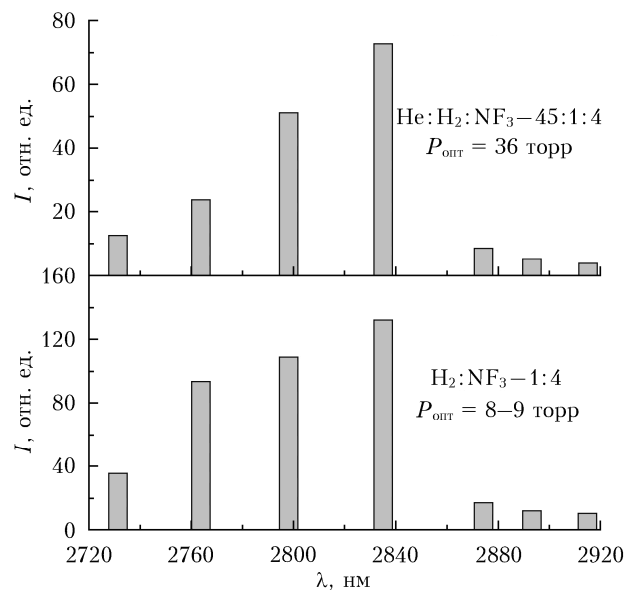


Рис. 3. Спектр генерации индукционного HF-лазера в смеси $H_2:NF_3-1:4$ (нижний) и $He:H_2:NF_3-45:1:4$ (верхний). Зарядное напряжение $U_3 = 25$ кВ

Такая особенность позволяет осуществлять плавную перестройку частоты генерации между разными группами (в первую очередь в области 2760–2840 нм), при этом интенсивность излучения будет оставаться практически одинаковой.

Как показали эксперименты, спектральный состав лазерного излучения мало зависел от наличия буферного газа в смеси. Добавление гелия привело лишь к незначительному перераспределению интенсивностей между некоторыми группами полос генерации.

Проводились исследования пространственных характеристик лазерного излучения. Как отмечалось выше, в наших экспериментах активная среда представляла собой полый цилиндр, в результате чего лазерный пучок имел форму кольца. Его внешний диаметр был близок к внутреннему диаметру лазерной трубки (2 см), а ширина оценивалась нами около 0,4–0,5 см. Анализ профиля позволил предположить наличие многомодового режима генерации. Вероятно, это связано с тем, что в наших экспериментах использовался резонатор, выполненный по типу открытого интерферометра Фабри–Перо с плоскими зеркалами. Детально модовый состав излучения не изучался, и данная тема, а также возможность ра-

боты лазера в одномодовом режиме — это задачи будущих исследований.

Заключение

Для исследования зависимости энергетических, временных, спектральных и пространственных характеристик генерации индукционного HF-лазера от условий накачки в качестве активной среды использовалась смесь водорода с F_2 , NF_3 и SF_6 , в качестве буферных газов — гелий и неон. Получена максимальная энергия генерации 19 мДж в смеси $He:H_2:NF_3-45:1:4$ при давлении 42 торр. Длительность импульсов генерации на полувысоте достигала 0,42 мкс, что соответствовало импульсной мощности 45 кВт. Форма импульса мало зависела от условий накачки. Исследования спектрального состава показали, что все излучение было сосредоточено в области 2730–2910 нм и состояло из семи групп полос вблизи 2732, 2763, 2798, 2835, 2873, 2893 и 2913 нм. Спектральный состав практически не зависел от состава активной среды, изменялось только соотношение интенсивностей отдельных компонент. Форма пятна генерации представляла собой кольцо диаметром около 2 см и шириной 0,4–0,5 см. Лазер имел высокую стабильность при работе в импульсно-периодическом режиме. Величина отклонения амплитуды световых импульсов не превышала 5–6%.

1. *Agroskin V.Y., Bravy B.G., Chernyshev Y.A., Kashtanov S.A., Kirianov V.I., Makarov E.F.* Aerosol sounding with a lidar system on a DF laser // *Appl. Phys. B.* 2005. V. 81, N 8. P. 1149–1154.

2. *Васильев Б.И., Маннун У.М.* ИК-лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // *Квант. электрон.* 2006. Т. 36, № 9. С. 801–820.
3. *Левин В.А., Сорокин А.А., Старик А.М.* Особенности распространения импульса излучения с длиной волны $\lambda = 2,8-3,3$ мкм в средах, содержащих пары воды // *Ж. техн. физ.* 1991. Т. 61, вып. 3. С. 41–48.
4. *Bulaev V.D., Gusev V.S., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Lysenko S.L., Morozov Yu.B., Poznyshov A.N., Firsov K.N.* High-power repetitively pulsed electric-discharge HF laser // *Quantum Electron.* 2010. V. 40, N 7. P. 615–618.
5. *Peng Ruan, Jijiang Xie, Laiming Zhang, Jin Guo, Jingjiang Xie, Guilong Yang, Dianjun Li, Qikun Pan, Gaijuan Tan, Fanjiang Meng, Shiming Li.* Computer modelling and experimental study of non-chain pulsed electric-discharge DF laser // *Opt. Express.* 2012. V. 20, N 27. P. 28912–28922.
6. *Lomaev M.I., Panchenko A.N., Panchenko N.A.* Spectral parameters of nonchain volume-discharge HF(DF) laser radiation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, iss. 4. P. 339–343.
7. *Ражев А.М., Мхитарян В.М., Чуркин Д.С.* FI-лазер в области 703–731 нм с возбуждением индукционным поперечным разрядом // *Письма в ЖЭТФ.* 2005. Т. 82, вып. 5. С. 290–294.
8. *Ражев А.М., Чуркин Д.С.* Индукционный ультрафиолетовый азотный лазер // *Письма в ЖЭТФ.* 2007. Т. 86, вып. 6. С. 479–483.
9. *Ражев А.М., Чуркин Д.С., Завьялов А.С.* Импульсный индукционный лазер на молекулярном водороде // *Вестн. НГУ. Сер. Физ.* 2009. Т. 4, вып. 3. С. 12–19.
10. *Razhev A.M., Churkin D.S.* Pulsed inductive discharge CO_2 laser // *Opt. Commun.* 2009. V. 282, N 7. P. 1354–1357.
11. *Razhev A.M., Churkin D.S., Kargapol'tsev E.S.* Chemical HF laser with pulsed inductive discharge initiation // *Laser Phys. Lett.* 2013. V. 7, N 10. 075002 (4 p).

A.M. Razhev, D.S. Churkin, E.S. Kargapol'tsev. Inductive HF laser.

Results of experimental investigations of dependence of energy, temporal, spectral, and spatial characteristics of inductive HF laser generation on pumping conditions are presented. Gas mixture of hydrogen with F_2 or NF_3 or SF_6 and their mixtures with helium and neon were used as an active medium. A maximum generation energy of 19 mJ in a gas mixture $He:H_2:NF_3-45:1:4$ under pressure of 42 Torr has been achieved. Pulse duration (FWHM) was 0.42 μs that corresponded to a pulse peak power of 45 kW. Spectral composition of inductive HF laser generation has been investigated for the first time. Lasing spectrum consisted of seven groups of bands near 2732, 2763, 2798, 2835, 2873, 2893, and 2913 nm. Lasing shape had a ring form with diameter of about 20 mm and thickness of 4–5 mm. The laser had high stability when operating in pulse periodic regime. The light pulse amplitude divergence was within 5–6%.