

Высокоэффективный химический HF-лазер с индуктивной стабилизацией разряда

Б.В.Лажинцев, В.А.Нор-Аревян, В.Д.Селемир

Разработан химический электроразрядный лазер с электродным узлом новой конструкции. Оба электрода выполнены из набора электрически изолированных друг от друга пластин, соединенных с общими шинами источника накачки отдельными стабилизирующими индуктивностями. Показано, что в таком устройстве реализуется устойчивый диффузный разряд в широком диапазоне давлений рабочего газа (20–130 Тор) и межэлектродного промежутка (10–50 мм). На смеси H_2-SF_6 получена энергия излучения 1.2 Дж с техническим КПД лазера 3.5 %.

Ключевые слова: пластинчатые электроды, индуктивная стабилизация разряда, HF-лазер.

В настоящее время активизировался интерес к химическим HF(DF)-лазерам с большим объемом активной среды [1]. Увеличение активного объема химических лазеров затрудняет его предыонизацию, требует повышения напряжения источника накачки и приводит к увеличению его индуктивности, а следовательно, к увеличению длительности разряда и потере его устойчивости. В связи с этим актуальна разработка простого по конструкции электродного узла, позволяющего формировать однородный устойчивый разряд без использования специальных устройств предыонизации. Эта задача успешно решена в [1] для смесей на основе углеводородов (углеводородов), использование которых вместо $H_2(D_2)$ позволяет существенно стабилизировать объемный разряд.

Стабилизация самостоятельного разряда в различных активных средах путем ограничения разрядного тока с помощью резистивных электродов из полупроводящего материала [2, 3], балластных резисторов [4, 5] и индуктивностей [6, 7] используется в различных газовых лазерах – на HF [2, 3, 5], KrF (XeCl) [6], CO_2 [7].

В работе [5] резистивный анодный электрод камеры HF-лазера был выполнен из ~2000 игл, залитых в верхней части раствором медного купороса. Максимальная энергия генерации 11 Дж с техническим КПД 3.8 % была получена на смеси состава $H_2:SF_6 = 1:25$ при полном давлении 156 Тор и удельном энергокладе 0.072 Дж/см³. Визуально однородный разряд наблюдался при давлениях активной смеси ниже 30 Тор.

В работе [3] анодный электрод HF-лазера был выполнен из поликристаллического Ge с удельным сопротивлением $\rho = 50$ Ом·см, а катод представлял собой латунную сетку, через которую осуществлялась УФ предыонизация. В лазере с таким электродным узлом были получены стабильные импульсы излучения на смеси $C_3H_8-SF_6$ при давлении 55 Тор с КПД 2.5 %. Флуктуация энергии излучения от импульса к импульсу составляла не более 1 %.

Резистивные стабилизирующие элементы при работе лазера в импульсно-периодическом режиме нагреваются, что приводит к потерям энергии, поэтому в таком режиме предпочтительно применение индуктивных стабилизирующих элементов.

Индуктивная стабилизация разряда в активной среде эксимерного KrF(XeCl)-лазера была осуществлена в работе [6]. Использовался секционированный катод, состоящий из изолированных сегментов, которые подсоединялись к общей шине с помощью индуктивностей по 150 нГн каждая. УФ предыонизация осуществлялась через сетчатый анод. Межэлектродное расстояние составляло 2.5 мм, зазор между сегментами – 0.79 мм. Максимальный КПД был равен 1.07 % в KrF-лазере и 0.6 % – в XeCl-лазере (полная длительность импульса излучения ~100 нс). Лазер работал при частоте следования импульсов до 70 Гц без прокачки газовой смеси. Эти результаты свидетельствуют о высокой стабильности разряда.

Индуктивная стабилизация разряда в CO_2 -лазере была осуществлена в работе [7]. Анодный электрод лазера был выполнен в виде сплошной алюминиевой пластины со скругленными краями. На рабочей поверхности секционированного катода находились металлические секции диаметром 0.35 мм, расположенные с плотностью ~200 см⁻² и соединенные балластными индуктивностями с общей шиной. Это позволило расширить диапазон безыскрового горения разряда по давлению в 2–3 раза, увеличить энергию генерации в 3–4 раза и существенно улучшить воспроизводимость результатов.

В настоящей работе исследуется новая конструкция электродного узла электроразрядного HF-лазера на смеси H_2-SF_6 с индуктивной стабилизацией разряда [8] без предыонизации активного объема. В экспериментах использовалась разрядная камера из нержавеющей стали диаметром 24 см и длиной 50 см, в которой с помощью проходных изоляторов располагался электродный узел, состоящий из двух идентичных пластинчатых электродов длиной ~280 мм. Каждый электрод состоял из 44 изолированных друг от друга медных пластин толщиной 1 мм с радиусом рабочей кромки 200 мм, расположенных с шагом 6.5 мм. Электроды устанавливались таким образом, чтобы каждая пластина катода располагалась в пло-

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 г.Саров, Нижегород. обл., просп. Мира,37; тел.: (8 3130) 4 55 84; эл.почта: selemir@vniief.ru

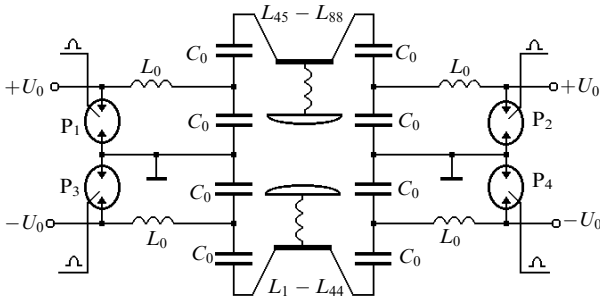


Рис.1. Электрическая схема химического лазера.

скости соответствующей пластины анода, причем расстояние между рабочими кромками анодных и катодных пластин могло меняться в диапазоне 30–50 мм. Каждая из пластин подсоединялась к одной из двух общих шин источника накачки с помощью стабилизирующей индуктивности ~ 500 нГн. Резонатор лазера был образован плоскими диэлектрическими зеркалами с коэффициентами отражения 98 и 65 %. Эти зеркала одновременно являлись торцевыми окнами разрядной камеры.

На рис.1 показана электрическая схема электроразрядного химического лазера. Высоковольтный генератор источника накачки был собран из 32 конденсаторов К15-24 (4.4 нФ, 30 кВ) по схеме двух LC-генераторов и заряжался до напряжения ± 22 кВ с помощью двухполярного источника питания. После включения разрядников P1–P4 (PY-73) к разрядному промежутку прикладывалось напряжение с фронтом нарастания, определяемым временем перезарядки емкостей C0.

В широком диапазоне давлений рабочей смеси вдоль оптической оси лазера наблюдался однородный диффузный безыскровой разряд, который формировался без предыонизации рабочего объема. При наблюдении сбоку разряд представлял собой отдельные бочкообразные диффузные плазменные образования между лежащими в одной плоскости анодными и катодными пластинами, перекрывающиеся в центральной части разряда.

На рис.2 представлены характерные осциллограммы импульсов напряжения на межэлектродном промежутке 50 мм и тока разряда для смеси состава H2:SF6 = 1:12 при общем давлении 68 Тор и зарядном напряжении U0 = ± 22 кВ. Сопротивление разряда в области максимума тока составляло 6–7 Ом.

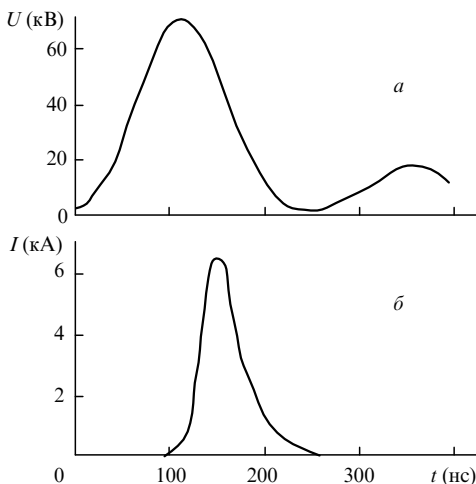


Рис.2. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке (а) и тока разряда (б).

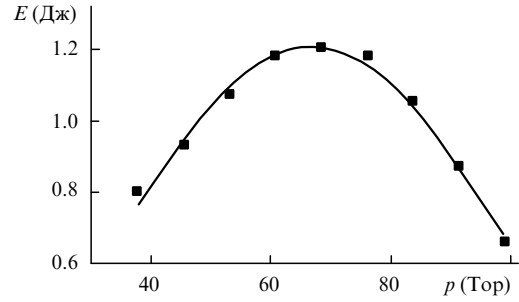


Рис.3. Зависимость энергии генерации от давления рабочей смеси для межэлектродного расстояния 50 мм.

Зависимость энергии генерации для межэлектродного промежутка 50 мм от давления газа для смеси состава H2:SF6 = 1:10 при зарядном напряжении U0 = ± 22 кВ представлена на рис.3. При суммарном давлении рабочего газа 68 Тор максимальная энергия генерации составила 1.2 Дж, технический КПД равнялся 3.5 %. В этом режиме сечение светового пучка в ближней зоне составляло ~ 49 × 25 мм, удельный энерговклад был равен ~ 0.1 Дж/см³, а средний удельный энергосъем лазерной энергии – примерно 3.5 мДж/см³. При минимальных давлениях в разряде искрообразование не наблюдалось, а с увеличением давления свыше 120 Тор возникали отдельные неяркие искры.

Для получения данных о КПД при увеличении энерговклада вдвое за счет уменьшения длины активного объема в два раза каждый из электродов был собран из трех групп электродных пластин с шагом 3.25 мм. В каждой группе было по 15 пластин, расстояние между группами пластин составляло 45 мм. В этом варианте электродного узла энергия генерации и КПД уменьшились примерно на 30 %.

Увеличение энерговклада в активный объем осуществлялось также и за счет уменьшения разрядного промежутка до 30 мм при сохранении шага между пластинами 6.25 мм. В этом случае область перекрытия дискретных плазменных образований заметно уменьшалась, сечение светового пучка в ближней зоне составляло ~ 28 × 21 мм, средний удельный энерговклад был равен ~ 0.2 Дж/см³, а средний энергосъем – примерно 6 мДж/см³. Максимальные энерговклад и энергосъем с учетом дискретности плазменных образований были примерно в полтора-два раза выше (0.3–0.4 Дж/см³ и 9–12 мДж/см³ соответственно). Наибольшая энергия генерации (1 Дж) в этом варианте была получена на смеси состава H2:SF6 = 1:13 при давлении 106 Тор с техническим КПД 3 %.

Проверка работоспособности электродного узла пла-

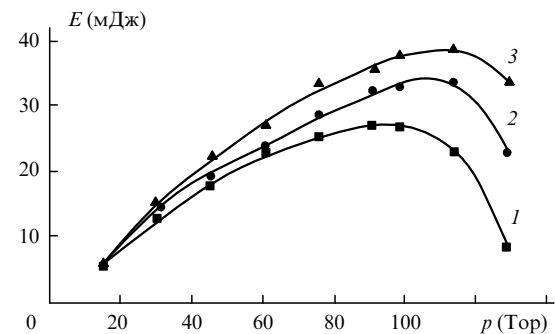


Рис.4. Зависимость энергии генерации от давления рабочей смеси для межэлектродного расстояния 10 мм при зарядном напряжении 26 (1), 28 (2) и 30 кВ (3).

стинчатой конструкции с индуктивной стабилизацией разряда при разрядном промежутке 120 мм осуществлялась в цилиндрической разрядной камере из диэлектрического материала. Высоковольтный генератор источника накачки был выполнен на основе двух LC-генераторов, которые могли заряжаться до напряжения ± 80 кВ, и разрядника обострителя. В смеси $\text{H}_2 - \text{SF}_6$ в широком диапазоне изменения состава и давления был сформирован устойчивый диффузный разряд. Получен КПД химического лазера до 3.5 % и удельный лазерный энергоотъем до 5 мДж/см³.

Для проверки эффективности пластинчатого электродного узла химического лазера с малым межэлектродным зазором и устойчивости частотного режима его работы без прокачки активной среды был собран электродный узел с межэлектродным расстоянием 10 мм. Общее число пластин на каждом электроде было увеличено до 100 штук. Расстояние между пластинами равнялось 1.2 мм, их толщина – 0.3 мм, что соответствовало шагу 1.5 мм. Длина активной части электрода составляла 150 мм, радиус рабочей кромки пластин – 120 мм. Каждая из пластин подсоединялась к общей шине с помощью индуктивности ~ 200 нГн. Разряд в межэлектродном промежутке возбуждался высоковольтным генератором, собранным по двухконтурной (C-C) схеме с коммутатором РУ-73. Обострительная емкость 2.7 нФ, собранная из конденсаторов КВИ-3 (0.68 нФ \times 20 кВ), располагалась непосредственно внутри рабочей камеры вблизи электродных пластин. Накопительная емкость 3 нФ располагалась снаружи рабочей камеры, напряжение зарядки накопительной емкости варьировалось в диапазоне 26 – 30 кВ.

Рабочая камера наполнялась активной смесью состава $\text{H}_2:\text{SF}_6 = 1:12$. Сечение лазерного пучка в ближней зоне имело высоту ~ 9 мм и ширину ~ 8 мм. Зависимость энергии генерации от давления рабочей смеси представлена на рис.4. Максимальная энергия генерации 38 мДж при удельном энергоотъеме ~ 3.4 мДж/см³ была получена для давления рабочей смеси 114 Тор и напряжения зарядки накопительной емкости 30 кВ, а максимальный технический КПД при оптимальном для каждого напряжения зарядки давлении рабочей смеси составил 2.7 % (26 кВ), 2.9 % (28 кВ) и 2.8 % (30 кВ). Таким образом, технический КПД сохраняется при увеличении удельного энергоотклада до 0.1 Дж/см³. Дальнейший рост энергии накачки лазера за счет увеличения накопительной емкости до 4 нФ (напряжение зарядки 30 кВ) приводил к снижению КПД до 2.5 %.

В последнем варианте химического лазера был осуществлен импульсно-периодический режим работы без прокачки рабочей смеси. Визуально наблюдался однородный диффузный разряд вплоть до частоты следования импульсов ~ 20 Гц, что свидетельствует о высокой устойчивости разряда.

Представляет интерес сравнение полученных в настоящей работе экспериментальных результатов с результатами работы [9], в которой исследовались энергетические характеристики лазеров со сплошными электродами и искровой предыонизацией на смеси $\text{H}_2 - \text{SF}_6$. На установке ДИЛАН с активным объемом $1 \times 1 \times 20$ см макси-

мальный технический КПД составил 2.2 % при удельном энергооткладе менее 0.05 Дж/см³, а при удельном энергооткладе ~ 0.1 Дж/см³ КПД снизился до ~ 1.5 %. На установке ЛИДА с активным объемом $2.5 \times 1.1 \times 60$ см КПД составил 1.6 % при выходной энергии 1.2 Дж и удельном энергооткладе ~ 0.4 Дж/см³. КПД лазеров с межэлектродными расстояниями 10 и 30 мм и индуктивной стабилизацией разряда почти в два превышал КПД лазеров ДИЛАН и ЛИДА при удельных энергооткладах в активную среду этих лазеров, близких к энергооткладам в настоящей работе.

Таким образом, использование пластинчатых электродов в сочетании с индуктивной стабилизацией разряда позволяет создавать высокоэффективные химические лазеры, простые и технологичные по конструкции. Существенным преимуществом предложенного электродного узла является возможность прокачки рабочего газа через электроды. В таком варианте лазера можно реализовать разрядный контур с минимальной индуктивностью, располагая источник накачки с двух боковых сторон разрядного промежутка, что является существенным при создании химических лазеров с большим объемом активной среды и значительным уровнем энергии. Межэлектродное расстояние в таких электродных конструкциях определяется характеристиками источника накачки (его индуктивностью и рабочим напряжением) и для напряжения около 500 кВ может достигать 300 мм и более. Выполнение источника накачки лазера из отдельных секций согласно [8] позволяет практически линейно увеличивать лазерную энергию при разумном увеличении длины разрядного промежутка.

В то же время высокая устойчивость разряда и прокачка газа через электроды позволяют работать с коэффициентом сменности рабочего газа, близким к единице, что особенно важно при работе лазера в высокочастотном режиме.

1. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **25**, 123 (1998).
2. Hatch C.V. *J.Phys.E*, **13**, 589 (1980).
3. Малюта Д.Д., Толстов В.Ф. *Квантовая электроника*, **10**, 441 (1983).
4. Beaulieu A.L. *Appl.Phys.Letts*, **16**, 504 (1970).
5. Pummer H., Breitfeld W., Wedler H., Klement G., Kompa K.L. *Appl. Phys.Letts*, **22**, 319 (1973).
6. Sze R.C.I. *Appl.Phys.*, **54**, 1224 (1983); US Patent № 4601039 (1986).
7. Лыткин А.П., Романов А.В., Сучков А.Ф. *ЖТФ*, **60**, 54 (1990).
8. Лажинцев Б.В., Нор-Аревян В.А. Патент России № 2105400 (12 ноября 1996); *Изобретения*, № 5, 481 (1998).
9. Горюнов Ф.Г., Гурков К.В., Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ю. *Квантовая электроника*, **21**, 1148 (1994).

B.V.Lazhintsev, V.A.Nor-Areвяn, V.D.Selemir. Highly efficient chemical HF laser with inductive stabilisation of the charge.

A chemical electric-discharge laser with a new design of the electrode unit was developed. Both electrodes consisted of a set of electrically insulated plates connected to a common bus of a pump source with separate stabilising inductances. It was found that a stable homogeneous discharge occurred in such a device in a wide range of active-gas pressures 20 – 130 Torr for an electrode gap of 10 – 50 mm. A radiation energy of 1.2 J with a technical laser efficiency of 3.5 % was achieved for an $\text{H}_2 - \text{SF}_6$ mixture.