

# Эффективные режимы генерации HF-лазера с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой самостоятельным разрядом

А.Н.Панченко, В.М.Орловский, В.Ф.Тарасенко, Е.Х.Бакшт

*Исследованы амплитудно-временные и спектральные характеристики лазерного излучения, а также характеристики разряда в смесях  $SF_6$  с водородом и углеводородами при высоких эффективностях генерации. При накачке от емкостного и индуктивного накопителей энергии получены КПД, составившие  $\sim 10\%$  от вложенной энергии. Показано, что во время импульса накачки максимальные эффективности реализуются при высоких значениях параметра  $E/p$  на лазерном промежутке. При использовании профилированных электродов и УФ предьонизации получены удельная энергия излучения нецепного HF-лазера  $\sim 140$  Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup> и эффективность генерации от запасенной энергии  $\sim 4.5\%$ . Показано, что спектр генерации нецепного HF-лазера в режиме высоких КПД существенно расширяется и реализуется каскадная генерация на колебательных переходах  $v(3-2) \rightarrow v(2-1) \rightarrow v(1-0)$  на ряде вращательных линий.*

**Ключевые слова:** нецепной HF-лазер, эффективность генерации, каскадная генерация, характеристики разряда, смеси с  $SF_6$ .

## 1. Введение

Исследованиям HF- и DF-лазеров с накачкой цепной и нецепной химическими реакциями в 60–70 годы прошлого века уделялось большое внимание [1, 2]. Затем интерес к этим лазерам уменьшился, но в последнее время нецепные HF- и DF-лазеры и разряд в смесях с  $SF_6$  вновь начали интенсивно изучаться [3–17]. Были получены высокие энергетические характеристики в одиночном и импульсно-периодическом режимах. Наиболее перспективными с точки зрения практической реализации являются лазеры с накачкой химической реакцией, инициируемой самостоятельным разрядом [3–8, 10, 14–17]. В ряде работ высокие характеристики излучения достигались без использования дополнительного источника предьонизации [4, 6, 18]. К настоящему времени получены КПД электроэлектродного нецепного HF-лазера от запасаемой в емкостном накопителе энергии 3%–4.3% и удельные энергии излучения 50–75 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup> [6, 16]. Возбуждение HF-лазера разрядом, инициируемым рентгеновским излучением, при начальном  $E/p$ , превышающем статическое пробивное значение, позволяет достичь удельной энергии излучения  $\sim 55$  Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup> при КПД относительно запасенной энергии до 4.5% [7, 15]. Данный способ накачки позволил получить в случае малых удельных энерговкладов ( $\sim 0.1$  кДж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>) в смесях с  $H_2$  эффективность генерации от вложенной энергии 8% [7].

В [8, 16] сообщалось о создании нецепного HF-лазера с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и КПД генерации от вложенной энергии 5.5% (эта энергия соответствовала энергии, запасенной в ин-

дуктивном накопителе) при сравнительно больших удельных энерговкладах ( $\sim 0.85$  кДж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>). В [16] при использовании интенсивной предьонизации нами были получены высокие энергетические параметры излучения HF-лазера в смесях как с углеводородами, так и с водородом, и рекомендовалось для получения максимальных энергетических характеристик лазеров данного типа применять профилированные электроды. Важная роль предьонизации для улучшения выходных параметров нецепного HF-лазера была показана в [15].

Цель настоящей работы – исследование режимов работы нецепного HF-лазера с накачкой от емкостных и индуктивных генераторов, позволяющих увеличить эффективность генерации и удельную энергию излучения.

## 2. Экспериментальная аппаратура и методики

В экспериментах использовались два лазера. Принципиальная схема установки с накачкой от емкостного накопителя энергии (установка 1) показана на рис.1,а. Лазер имел активный объем  $2.3 \times (0.8 - 1.4) \times 62$  см (межэлектродный зазор  $d = 2.3$  см). Предьонизация разрядного промежутка осуществлялась излучением поверхностного разряда через один из электродов, который был выполнен перфорированным. Интенсивность предьонизации могла изменяться за счет энергии, вкладываемой в поверхностный разряд при изменении емкости  $C_2$ ; в ряде экспериментов система предьонизации отключалась. Емкости конденсаторов были следующими:  $C_0 = 76$  нФ,  $C_1 = 3.3$  нФ и  $C_2 = 21$  нФ.

В установке 2 (рис.1,б) использовались лазерные камеры примерно одинакового объема, различающиеся межэлектродным зазором. Первый вариант установки 2 (2А) имел активный объем  $2 \times (\sim 1.6) \times 62$  см (межэлектродный зазор  $d = 2$  см), а второй вариант (2Б) – активный объем  $3.8 \times (0.6 - 0.8) \times 72$  см (межэлектродный за-

А.Н.Панченко, В.М.Орловский, В.Ф.Тарасенко, Е.Х.Бакшт. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 4

Поступила в редакцию 21 июня 2002 г., после доработки – 2 декабря 2002 г.

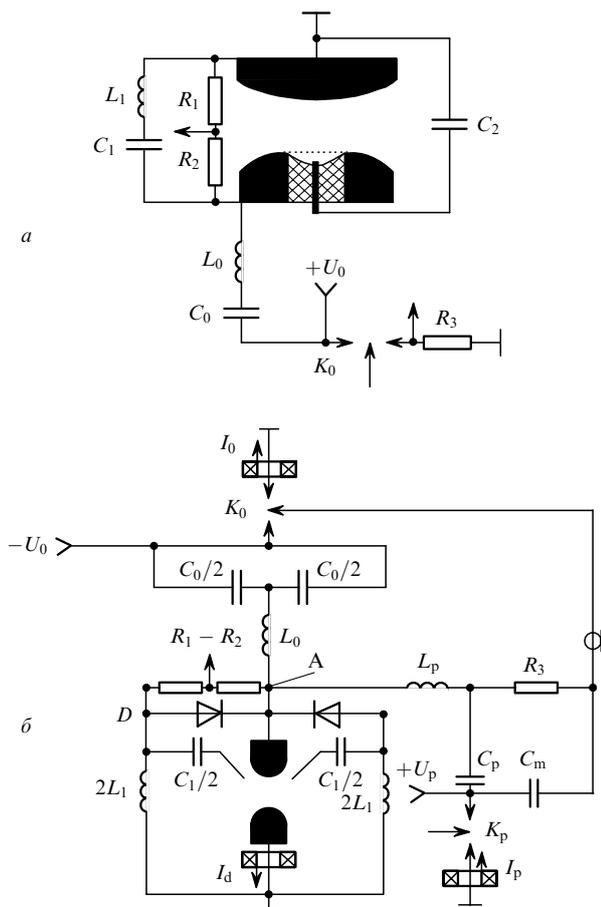


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы HF-лазеров с накачкой от емкостного (а), а также от индуктивного и емкостного (б) накопителя энергии:  
 $K_0, K_p$  – искровые разрядники;  $C_0$  – первичный емкостной накопитель;  $C_1$  – обострительный конденсатор;  $C_2$  – конденсатор подсветки;  $C_p$  – емкость накачки SOS-диодов  $D$  в прямом направлении;  $C_m$  – пусковой конденсатор;  $L_0, L_1, L_p$  – индуктивности;  $U_0, U_p$  – зарядные напряжения;  $R_1, R_2, R_3$  – делители напряжения и токовый шунт;  $I_0, I_d, I_p$  – пояса Роговского.

зор  $d = 3.8$  см). Активный объем в обоих случаях составлял  $\sim 200$  см<sup>3</sup> и зависел от зарядного напряжения, состава и давления смеси, обусловленного изменением ширины разрядной области. Эксперименты на установке 2 были проведены при накачке как от индуктивного, так и от емкостного накопителя энергии. Подобный лазер с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока ранее использовался для накачки ХеСl-лазера (подробное описание см. в [19]). Предыонизация от 72 искровых промежутков, равномерно расположенных с двух сторон анода, обеспечивала равномерное облучение катода. Емкости и индуктивности были следующими:  $C_0 = 70$  нФ,  $C_1 = 2.4$  нФ,  $C_m = 1.5$  нФ,  $C_p = 36$  нФ,  $L_0 = 33$  нГ,  $L_1 = 14$  нГ и  $L_p = 870$  нГ. При накачке от индуктивного накопителя длительность импульса тока разряда составляла около 100 нс, а при накачке от емкостного накопителя  $C_0$  (в этом случае отключались  $C_p$  и  $L_p$  в точке А, рис.1,б) она возрастала до  $\sim 200$  нс. Отметим, что в установке 2Б с  $d = 3.8$  см использовались два профилированных полированных электрода из нержавеющей стали, позволяющие существенно уменьшить неоднородности электрического поля (локальное усиление поля) на электродах и в разрядном промежутке.

Характеристики разряда и генерации изучались в SF<sub>6</sub> и смесях SF<sub>6</sub> с углеводородами (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) или водородом при давлениях 0,01–0.2 атм и большом содержании электроотрицательного газа (свыше 70 %). Состав рабочей смеси, как уже отмечалось, влиял на ширину разряда. Минимальная ширина зоны разряда и лазерного пучка регистрировалась в смесях с водородом при наименьших зарядных напряжениях, а наибольшая ширина лазерного пучка – в смесях с тяжелыми углеводородами при наибольших зарядных напряжениях.

Энергия излучения измерялась калориметрами ИКТ-1Н и ОРНIR с измерительной головкой FL-250А-ЕХ, а мощность и форма импульса излучения – приемником ФСГ-22, охлаждаемым жидким азотом. Спектральные характеристики излучения определялись с помощью монохроматора МДР-12 и приемника ФСГ-22. Амплитудно-временные характеристики разряда регистрировались с помощью делителей напряжения, поясов Роговского и шунтов. Электрические сигналы подавались на осциллографы TDS-220 или TDS-224, интегральная картина свечения разряда снималась цифровым фотоаппаратом Олимпикс 2000.

### 3. Характеристики разряда в SF<sub>6</sub> и смесях SF<sub>6</sub> с углеводородами (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) и водородом

Как показали анализ известных работ [1–18] и наши исследования, на характеристики разряда влияют различные факторы: величина межэлектродного промежутка, состав и давление смеси, состояние поверхности электродов, наличие и уровень предыонизации, длительность импульса накачки, профиль электродов, мощность накачки и т. д. Причем порог генерации достигается при очень широком изменении параметров импульса накачки, а также состава и давления смеси. Остановимся на наиболее важных особенностях разряда.

1. В рабочих смесях нецепного HF-лазера содержание тяжелого электроотрицательного газа SF<sub>6</sub> составляет 70 % и более. Однако как в SF<sub>6</sub>, так и в смесях SF<sub>6</sub> с углеводородами или водородом имеются диапазоны давления смеси, напряжения и длительности импульса накачки, при которых сравнительно легко формируется объемный разряд. При наличии предыонизации напряжение пробоя разрядного промежутка уменьшается. Это приводит к уменьшению амплитуды тока через лазерную камеру, но энергия генерации при этом увеличивается [16].

2. При формировании объемного разряда в рабочей смеси накопительный конденсатор генератора накачки может разряжаться не полностью, и на промежутке остается напряжение, соответствующее  $E/p \lesssim 95$  кВ·см<sup>-1</sup> × атм<sup>-1</sup>. Это напряжение увеличивается при уменьшении зарядного напряжения или росте давления смеси. Наличие высокого остаточного напряжения (даже в случае предыонизации) обычно приводит к повторному пробоя разрядного промежутка в локальной области и к образованию яркого канала. Время запаздывания повторного пробоя существенно зависит от уровня предыонизации, конструкции электродов, зарядного напряжения  $U_0$  и увеличивается при уменьшении  $U_0$ , росте интенсивности предыонизации, а также при улучшении равномерности электрического поля на электродах и в промежутке.

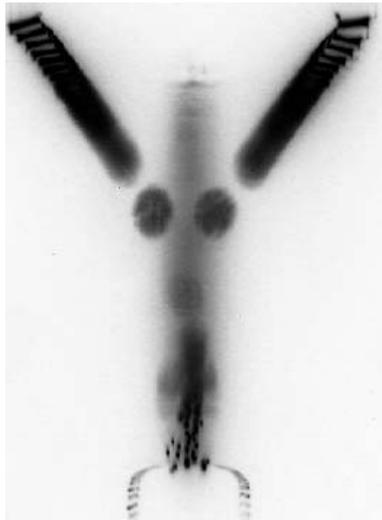


Рис.2. Фотография интегрального свечения разряда в смеси SF<sub>6</sub>: C<sub>3</sub>H<sub>12</sub> = 36 : 2 Тор. Накачка от индуктивного накопителя при U<sub>p</sub> = 15 кВ и U<sub>0</sub> = 25 кВ (установка 2Б).

При использовании профилированных электродов и предыонизации нами на установке 2Б были реализованы режимы накачки, в которых после окончания импульса тока разряда повторный пробой разрядного промежутка отсутствовал, а оставшаяся в конденсаторе энергия выделялась в зарядном сопротивлении в течение длитель-

ного времени. При разряде в чистом SF<sub>6</sub> увеличение зарядного напряжения приводило к большому запаздыванию повторного пробоя, и начиная с U<sub>0</sub> ~ 26 кВ при давлении SF<sub>6</sub> 36 Тор повторный пробой не регистрировался, а свечение разряда в промежутке было совершенно однородным. Фотография свечения разрядного промежутка в режиме без повторного пробоя приведена на рис.2. Видно, что разряд в смеси очень однородный, и только у поверхности катода (внизу) заметны более яркие образования. Искровые промежутки предыонизации расположены с двух сторон анода (вверху на фотографии – два ряда более ярких полосок). Два круглых пятна у разрядной области – отражение излучения искровых промежутков в заднем зеркале.

3. На рис.3 и 4 приведены осциллограммы напряжения, тока через разрядный промежуток и лазерного излучения при возбуждении разряда от емкостного и индуктивного накопителей энергии в SF<sub>6</sub> и различных смесях. Наибольшие остаточные напряжения и напряжения в течение тока разряда регистрируются в SF<sub>6</sub>. Разбавление SF<sub>6</sub> водородом, а еще в большей степени – соединениями углерода с водородом приводит, при прочих равных условиях, к уменьшению остаточного напряжения и напряжения на разрядном промежутке во время накачки. Увеличение парциального давления водорода или углерода в смеси при фиксированном парциальном давлении SF<sub>6</sub> увеличивает остаточное напряжение, но слабо влияет на напряжения во время накачки. Добавление углеводородов, потенциал ионизации которых меньше,

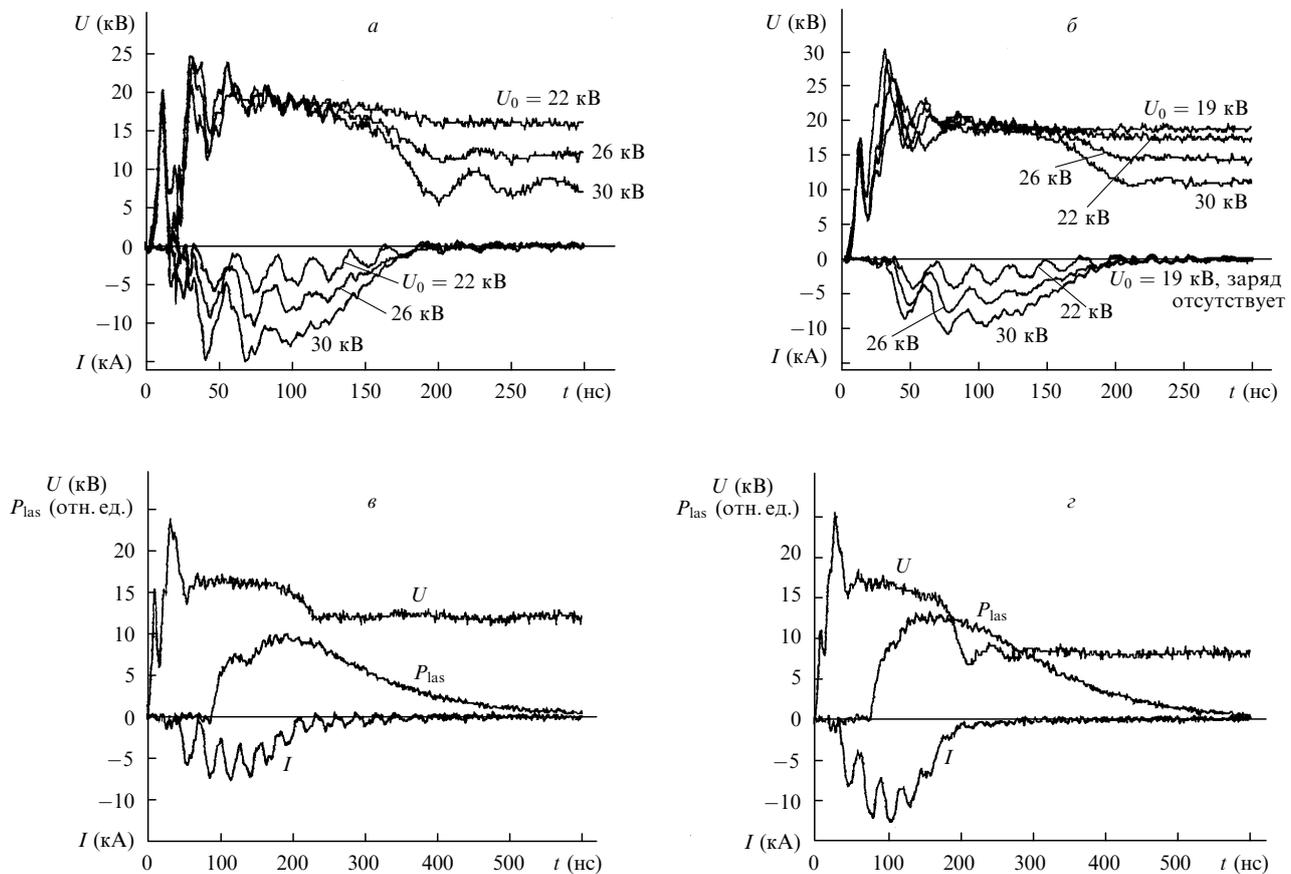


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке и тока разряда, полученные при использовании емкостного накопителя энергии в SF<sub>6</sub> при давлении 36 Тор (а) и смеси SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 36 : 4.5 Тор (б), а также осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке, тока разряда и лазерной генерации в смеси SF<sub>6</sub>: C<sub>3</sub>H<sub>12</sub> = 33 : 2 Тор при зарядном напряжении емкостного накопителя 22 (в) и 26 кВ (з) (установка 2Б).

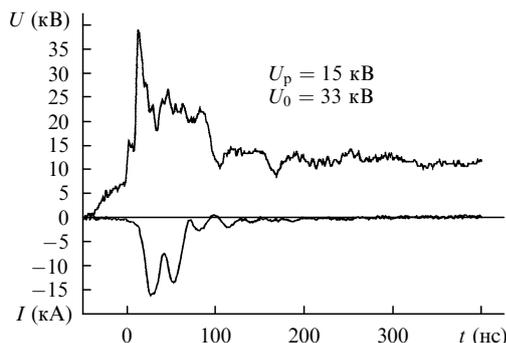


Рис.4. Осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке и тока разряда, полученные в случае использования индуктивного накопителя в смеси SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 48 : 6 Тор (установка 2Б).

чем у водорода и SF<sub>6</sub>, позволяет получать объемный разряд при существенно меньшей интенсивности предыонизации. С уменьшением зарядного напряжения остаточное напряжение увеличивается вплоть до величины зарядного напряжения; в этом случае пробоя промежутка не происходит (например, при U<sub>0</sub> ~ 19 кВ для смеси SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 36 : 4.5 Тор, установка 2Б, рис.3,б). При образовании неоднородностей в разряде наблюдается заметный спад напряжения во время накачки, и остаточное напряжение после окончания импульса тока становится практически равным нулю. Этому при прочих равных условиях способствует уменьшение давления смеси или межэлектродного зазора. С увеличением U<sub>0</sub> остаточное напряжение также уменьшается.

4. При использовании индуктивного накопителя энергии (рис.4) увеличиваются напряжение пробоя промежутка, а также амплитуда разрядного тока. Длительность импульса накачки при этом сокращается. Величина остаточного напряжения при накачке от индуктивного накопителя энергии зависит от давления смеси и определяется передачей части запасаемой энергии из емкости C<sub>0</sub> в емкость C<sub>p</sub> в течение импульса возбуждения. Применение индуктивного накопителя энергии позволяет заметно увеличить пробивное напряжение, при этом регистрируется короткий импульс тока с крутым передним фронтом и амплитудой до 30 кА. Существенно, что значительный энерговклад осуществляется при высокой напряженности электрического поля на промежутке во время спада напряжения после пробоя.

### 4. Амплитудно-временные параметры излучения

Характеристики лазерного излучения были исследованы на всех установках, наиболее важные результаты приведены на рис.5 и 6. Порог генерации обычно достигался через 50 нс или более после начала пробоя промежутка, а длительность импульса излучения по основанию составляла 500–800 нс. Энергия излучения лазера и эффективность генерации, как и следовало ожидать, в первую очередь определялись качеством сформированного разряда. При использовании предварительной ионизации энергия и эффективность генерации во всех экспериментах были выше, чем в ее отсутствие. Это объясняется одновременным формированием объемного разряда по всей поверхности электродов, а также ухудшением однородности разряда.

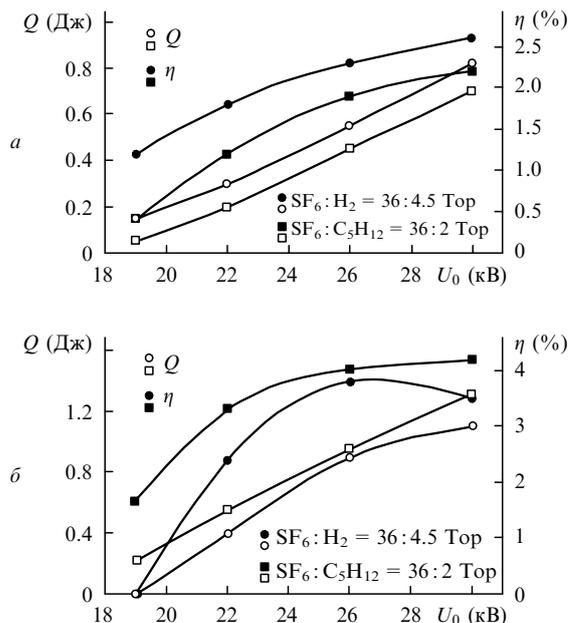


Рис.5. Зависимости энергии излучения Q и КПД HF-лазера η относительно энергии, запасаемой в C<sub>0</sub>, от зарядного напряжения первичного накопителя U<sub>0</sub> при накачке индуктивным (а) и емкостным (б) накопителями для смесей SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 36 : 4.5 Тор и SF<sub>6</sub>: C<sub>3</sub>H<sub>12</sub> = 36 : 2 Тор (установка 2Б).

Сравнение энергии генерации в смесях с водородом и углеводородами показало, что при уменьшении интенсивности предыонизации или в ее отсутствие, а также при увеличении длительности импульса накачки предпочтительнее использовать смеси с углеводородами. Подобные результаты были получены ранее в работах [6, 7, 15, 16]. Однако при формировании однородного разряда (за счет увеличения интенсивности предыонизации и (или) использования индуктивного накопителя энергии) в смесях с водородом достигается более высокий КПД генерации, а в ряде режимов и большие энергии излучения. Это согласуется с результатами работы [20], где при использовании короткого импульса накачки (~ 10 нс) и интенсивной предыонизации оптимальное давление составило 0.65 атм, энергия излучения в смесях с водородом была в два раза выше, чем в смесях с C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, а максимальная удельные энергии излучения равнялись 22 Дж/л (34 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>).

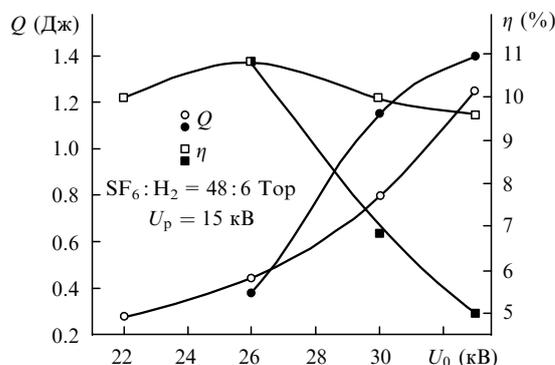


Рис.6. Зависимости энергии излучения Q и КПД HF-лазера η относительно вложенной энергии от зарядного напряжения первичного накопителя U<sub>0</sub> при накачке индуктивным (□, ○) и емкостным (●, ■) накопителями для смеси SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 48 : 6 Тор (установка 2Б).

На установке 2А с зазором 2 см даже в случае использования УФ предьонизации энергия излучения не превышала 0.2 Дж при работе как с индуктивным накопителем, так и без него. В разряде из-за неоднородностей поля на катоде при сравнительно низких давлениях формировались яркие точки, а при накачке от емкостного накопителя контрагирование разряда обычно наблюдалось через 100–200 нс после пробоя промежутка.

Существенное улучшение лазерных параметров было получено при увеличении зазора до 3.8 см и использовании профилированных электродов (установка 2Б). На рис.5 и 6 приведены зависимости энергии и КПД генерации от запасенной и вложенной энергии. При работе с индуктивным накопителем лучшие результаты получены со смесями с водородом, а энергия излучения составила 1.2 Дж при  $U_0 = 33$  кВ (рис.6, светлые квадраты). В случае емкостного накопителя в смесях с пентаном энергия излучения была выше (рис.5,б) и в оптимальных условиях достигала 1.4 Дж при КПД от запасаемой энергии 4.5 % и удельной энергии генерации до  $\sim 140$  Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>. Уменьшение энергии излучения и КПД (относительно энергии, запасаемой в  $C_0$ ) при работе с индуктивным накопителем связано с потерей энергии при передаче из емкостного накопителя в индуктивность разрядного контура. Отметим, что относительные потери энергии в прерывателе тока с ростом  $U_0$  уменьшались, поэтому КПД лазера с индуктивным накопителем энергии возрастал при увеличении зарядного напряжения первичного накопителя  $C_0$  (рис.5,а).

В оптимальных условиях эффективность генерации относительно вложенной энергии лазера с индуктивным накопителем энергии достигала  $\sim 11$  % при удельной энергии излучения до 5.5 Дж/л (100 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>) (рис.6). Во всех случаях разряд был совершенно однороден, только у катода наблюдалось более яркое свечение (см. рис.2). При относительно малых зарядных напряжениях высокий КПД от вложенной энергии ( $\sim 10$  %) был получен и при накачке от емкостного накопителя энергии (рис.6). В смеси SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 48:6 Тор, накачиваемой от емкостного накопителя, генерация начинала начиная с зарядного напряжения  $\sim 26$  кВ. В этом случае максимальная эффективность генерации от вложенной энергии также достигала  $\sim 11$  %. Увеличение зарядного напряжения приводило к уменьшению эффективности генерации от вложенной энергии, хотя КПД от запасенной энергии возрастал.

При накачке той же смеси генератором с индуктивным накопителем энергии генерация возникала при зарядном напряжении  $\sim 20$  кВ, но КПД от вложенной энергии при изменении зарядного напряжения от 22 до 33 кВ оставался примерно постоянным (рис.6).

При оптимизации разрядного контура (уменьшении  $L_0$  и  $L_1$  до предельно возможных значений) с накачкой от емкостного накопителя при использовании интенсивной предьонизации на установке 1 с активным объемом  $2.3 \times 1.2 \times 62$  см была получена энергия излучения 8.8 Дж/л (73 Дж·л<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>) при КПД от запасенной энергии 3.3 %.

## 5. Спектральные характеристики излучения

Исследование спектрально-временных характеристик излучения показало, что в режимах максимального КПД спектр генерации HF-лазера существенно расширяется по сравнению с обычным режимом накачки [3, 20]. Так,

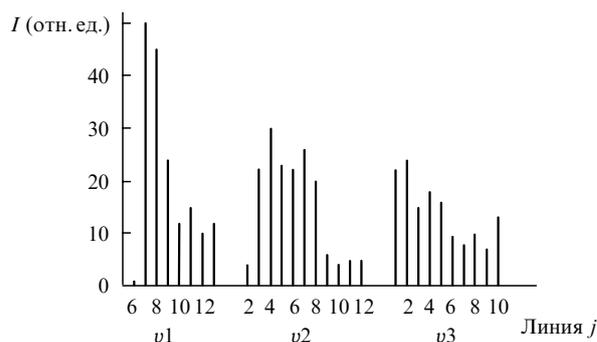


Рис.7. Спектр излучения HF-лазера при высоких КПД и накачке индуктивным накопителем;  $U_p = 15$  кВ,  $U_0 = 30$  кВ, смесь SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 48:6 Тор (установка 2Б).

при высоком КПД генерации в спектре излучения HF-лазера число вращательных линий на колебательном переходе  $v(3-2)$ ,  $v(2-1)$  и  $v(1-0)$  основного электронного состояния увеличивается до 8–11, а общее число линий генерации достигает 30 (рис.7). Из анализа амплитудно-временных характеристик генерации на отдельных колебательно-вращательных линиях (рис.8) следует, что вращательные переходы  $j(5 \rightarrow 6, 6 \rightarrow 7, 7 \rightarrow 8)$  колебательного перехода  $v(3-2)$  вносят вклад в формирование инверсии населенности на вращательных переходах  $j(6 \rightarrow 7, 7 \rightarrow 8, 8 \rightarrow 9)$  колебательного перехода  $v(2-1)$  и далее заселяют верхние состояния вращательных переходов  $j(7 \rightarrow 8, 8 \rightarrow 9, 9 \rightarrow 10)$  колебательного перехода  $v(1-0)$ . При этом наибольшие длительности импульсов генерации регистрируются на вращательных линиях колебательного перехода  $v(1-0)$ . В данных условиях мы не наблюдали сильных линий излучения с более высоких колебательных уровней ( $v = 4, 5, 6$ ), которые регистрировались при повышенных давлениях рабочей смеси в HF-лазере с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов [11].

## 6. Обсуждение результатов

Основные процессы, происходящие в газоразрядной плазме HF-лазера, анализировались с использованием констант и скоростей процессов, приведенных в [21–26]. Наиболее существен вклад следующих процессов, скорости реакций которых приведены при температуре электронов 7 эВ, что соответствует  $E/p \sim 80$  кВ·см<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup> [22].

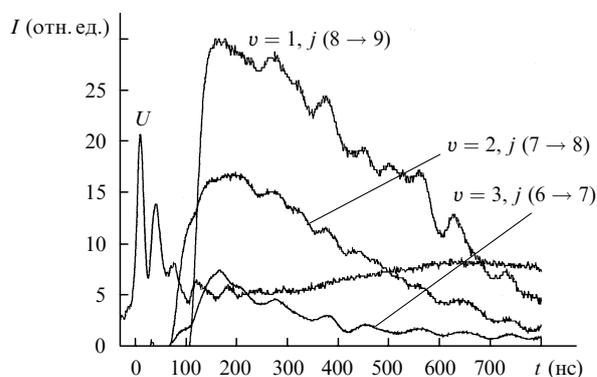


Рис.8. Осциллограммы импульсов каскадной генерации на вращательных линиях HF-лазера при высоких КПД и накачке индуктивным накопителем;  $U_p = 15$  кВ,  $U_0 = 30$  кВ, смесь SF<sub>6</sub>: H<sub>2</sub> = 48:6 Тор (установка 2Б).

Ионизация SF<sub>6</sub> и водорода (или углеводородов):



скорость реакции  $0.52 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$  [25]; в данных условиях этот процесс является основным. Отметим, что в результате (1) образуется атомарный фтор, который участвует в химической реакции по наработке рабочих молекул HF ( $v = 1, 2, 3$ ).

Ионизация SF<sub>5</sub>:



скорость реакции  $0.13 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [25]; в условиях нашего эксперимента концентрация SF<sub>5</sub> на несколько порядков меньше концентрации SF<sub>6</sub>, поэтому вклад данного процесса мал по сравнению со вкладом реакции (1).

Ионизация углеводородов:



Вклад этого процесса мы не оценивали, но из осциллограмм напряжения и тока видно, что при разбавлении смеси водородом и в особенности углеводородами ток разряда увеличивается, а остаточное напряжение уменьшается, причем это уменьшение тем больше, чем меньше в смеси SF<sub>6</sub>.

Сечение ионизации растет при увеличении температуры электронов (параметра  $E/p$ ); для реакций (1), (2) сечения приведены в [21–23].

Диссоциация SF<sub>6</sub> в реакциях



скорость реакции  $0.15 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [25], процесс является основным, и



скорость реакции ( $0.72 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$  [25]) на 1.5 порядка меньше скорости реакции (4).

Диссоциация SF<sub>5</sub>:



скорость реакции  $0.47 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [25]. Поскольку в условиях нашего эксперимента концентрация SF<sub>5</sub> меньше концентрации SF<sub>6</sub> на несколько порядков, то вклад данного процесса мал по сравнению со вкладом процесса (4). В целом же скорость диссоциации при параметре  $E/p = 80–250 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$  растет с увеличением  $E/p$  и превышает скорость ионизации на порядок [23].

Прилипание электронов к SF<sub>6</sub> в реакциях



константа реакции  $0.31 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$  [25], при  $E/p < 60 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$  [22] этот процесс является основным, и



константа реакции  $0.13 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$  [25]; в результате данного процесса также образуется атомарный фтор, который участвует в химической реакции по наработке рабочих молекул HF ( $v = 1, 2, 3$ ). Процесс является основным при  $E/p > 60 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$  [22].

Ион-ионная рекомбинация, приводящая к уменьшению концентрации отрицательных и положительных ионов:



где X<sup>-</sup> – отрицательные ионы SF<sub>6</sub><sup>-</sup> и SF<sub>5</sub><sup>-</sup>, а Y<sup>+</sup> – положительные ионы SF<sub>5</sub><sup>+</sup> и другие. Константа реакции  $0.10 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [25]. При уменьшении  $E/p$  от  $\sim 60$  до  $\sim 25 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$  константа увеличивается в несколько раз [13]. Отметим, что с ростом давления основной вклад начинает вносить трехчастичная ион-ионная рекомбинация.

Взаимодействие атомарного фтора с молекулярным водородом (углеводородами), приводящее к образованию возбужденных молекул HF\* [1, 2]:



При этом распределение энергии по колебательным уровням таково [26]:

$$(v = 0) : (v = 1) : (v = 2) : (v = 3) = 0 : 0.15 : 0.55 : 0.3. \quad (11)$$

При работе HF-лазера можно определить следующие условия получения высоких КПД и энергии генерации:

1. Высокие КПД (более 10 % от вложенной энергии) достигаются при накачке от емкостного накопителя энергии, малых удельных энерговкладах ( $0.1–0.15 \text{ кДж} \times \text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ ) и больших остаточных напряжениях на разрядном промежутке, причем максимальные КПД реализуются в смесях с водородом.

2. При накачке от индуктивного накопителя энергии высокие КПД (более 10 % от вложенной энергии) достигаются как при малых ( $0.1 \text{ кДж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ ), так и при достаточно больших ( $0.8 \text{ кДж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ ) удельных энерговкладах. В последнем случае оптимальные смеси имеют большее давление. Пробой лазерного промежутка при накачке от индуктивного накопителя энергии происходит при  $E/p \sim 150 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ . Отметим, что на установке 2Б энергия, запасаемая в индуктивном накопителе, была ограничена электрической прочностью первичного емкостного накопителя. При замене C<sub>0</sub> и увеличении U<sub>0</sub> до 33 кВ мы получили энергию излучения 1.2 Дж, которая не является предельной и может быть увеличена при больших C<sub>0</sub>.

3. При накачке от емкостного накопителя энергии максимальные энергии излучения и КПД от запасаемой энергии достигаются при наибольших зарядных напряжениях, малой индуктивности разрядного контура и малых остаточных напряжениях на промежутке. В этих режимах эффективности генерации от вложенной и запасенной энергии существенно не различаются. Максимальная энергия излучения на установке 1 составила  $\sim 1.8$  Дж при КПД от запасаемой энергии 3.3 %, а на установке 2Б она была равна 1.65 Дж при КПД от запасаемой энергии до 4.5 %. В зависимости от вложенной энергии, профиля электродов и уровня предьонизации максимальные энергии излучения реализуются в смесях как с водородом, так и с углеводородами.

Анализ скоростей реакций и сечений ионизации, диссоциации, рекомбинации и прилипания показывает, что с увеличением электронной температуры ( $E/p$  на промежутке) относительный вклад прилипания, возбуждения и рекомбинации уменьшается, а вклад диссоциации и ионизации увеличивается. Причем в случае  $E/p > 60 \text{ кВ}\times$

$\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$  процесс прилипания электронов также начинает вносить вклад в наработку атомарного фтора (реакция (8)). По-видимому, при высоких  $E/p$  на разрядном промежутке эффективность наработки атомарного фтора в активной среде HF-лазера возрастает, что и приводит к увеличению КПД относительно вложенной энергии. С ростом тока разряда при сохранении высоких значений параметра  $E/p$  доля потерь энергии на прилипании, возбуждение и рекомбинацию в исследованных условиях существенно не изменяется, поэтому при накачке лазером с индуктивным накопителем энергии высокие КПД реализуются и в случае больших энергокладов, если при этом сохраняется объемный характер разряда.

Распределение энергии лазерного излучения по колебательным полосам не соответствует соотношению (11). Данное несоответствие обусловлено последовательной генерацией на трех колебательных переходах. Излучение на колебательном переходе  $3 \rightarrow 2$  вносит вклад в генерацию на переходе  $2 \rightarrow 1$ , и излучение на переходе  $2 \rightarrow 1$  вносит значительный вклад в генерацию на переходе  $1 \rightarrow 0$ . Длительность импульса генерации максимальна на переходе  $1 \rightarrow 0$ , а доля полной энергии излучения на этом переходе существенно превышает 15 %.

## 7. Выводы

Реализованы два режима работы HF-лазера с высоким КПД ( $\sim 10\%$  от вложенной энергии) при накачке от емкостного и индуктивного накопителей энергии. В случае накачки от генератора с емкостным накопителем энергии максимальные КПД достигаются при относительно малых зарядных напряжениях, когда остаточное напряжение после окончания разряда и напряжение на плазме во время накачки максимальны. Для данного режима характерны относительно малые удельные энергоклады ( $0.1-0.15 \text{ кДж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ ) и удельные энергии излучения ( $\sim 15 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ ), а наибольшие эффективности достигаются в смесях с водородом. Общий КПД лазера в этом режиме может быть существенно увеличен при использовании, например, генератора на основе линии с распределенными параметрами, который имеет волновое сопротивление, равное сопротивлению разрядной плазмы во время накачки, и полностью передает энергию в активный объем. Данный режим перспективен для создания импульсно-периодических лазеров.

При накачке от генератора с индуктивным накопителем энергии высокие КПД реализуются в более широких диапазонах зарядного напряжения и энергоклада, что позволило получить удельную энергию генерации до  $5.5 \text{ Дж/л}$  ( $\sim 100 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ ) при КПД порядка 10 %. В этом режиме наибольшие эффективности также достигаются в смесях с водородом.

Максимальные удельные энергии излучения были реализованы при использовании в лазерах емкостных накопителей с минимальной индуктивностью разрядного контура. Сравнение максимальных энергий в смесях с водородом и углеводородами показало, что наибольшая энергия излучения на установке 1 была получена в смеси с

водородом, а на установке 2Б – в смеси с углеводородом. С увеличением длительности импульса накачки наблюдалось снижение напряжения на лазерном промежутке во время импульса тока. При этом все большая часть энергии вкладывалась в рабочую смесь при более низких значениях параметра  $E/p$ , существенно уменьшалось и остаточное напряжение. Эффективность генерации от вложенной энергии в этом случае уменьшилась (до 4.7 %) и существенно не отличалась от эффективности, рассчитанной относительно запасаемой в конденсаторе  $C_0$  энергии (до 4.5 %). Для достижения максимальных энергетических параметров лазера следует использовать как предыонизацию, так и профилированные электроды.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ, проект № 1206.

1. *Химические лазеры*. Под ред. Р.Гросса и Дж.Ботта (М.: Мир, 1980).
2. *Химические лазеры*. Под ред. Н.Г. Басова (М.: Наука, 1982).
3. Горюнов Ф.Г., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др. *Квантовая электроника*, **21**, 1148 (1994).
4. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. *Письма в ЖТФ*, **22** (24), 60 (1996).
5. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **24**, 457 (1997).
6. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф. и др. *Изв. РАН. Сер. физич.*, **64**, 1439 (2000).
7. Richeboeuf L., Pasquiers S., Doussiet F., et al. *Appl. Phys. B*, **68**, 45 (1999).
8. Baksh E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35**, 261 (1999).
9. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 207 (2000).
10. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.В. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 225 (2000).
11. Ерофеев М.В., Орловский В.М., Скакун В.С. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 486 (2000).
12. Бычков Ю.И., Горчаков С.Л., Ястремский А.Г. *Квантовая электроника*, **30**, 733 (2000).
13. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **31**, 629 (2001).
14. Булаев В.Д., Куликов В.В., Петин В.Н., Югов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 218 (2001).
15. Lascour V., Pasquiers S., Postel S., Puech V. *Appl. Phys. B*, **72**, 45 (2001).
16. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Панченко А.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 1035 (2001).
17. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **32**, 95 (2002).
18. Запольский А.Ф., Юшко К.Б. *Квантовая электроника*, **6**, 408 (1979).
19. Бакшт Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **30**, 506 (2000).
20. Brink D.J., Hasson V., von Bergmann H.M. In: *Proc. Intern. Conf. LASERS'99* (McLEAN, VA: STS Press, 1980, p. 524).
21. Novak J.P., Frechette M.F. *J. Appl. Phys.*, **55**, 107 (1984).
22. Бортник И.М. *Физические свойства и электрическая прочность элегаза* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
23. Phelps A.V., Van Brunt R.J. *J. Appl. Phys.*, **64**, 4269 (1988).
24. Xiao D.M., Zhu L.L., Chen Y.Z. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, L18 (1999).
25. Riccardi C., Barni R., De Colle F., Fontanesi M. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **28**, 278 (2000).
26. Manke H.G.C., Hager G.D. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **30**, 713 (2001).