

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

ОСОБЕННОСТИ НАКАЧКИ ЛАЗЕРА НА СМЕСИ $SF_6-H_2(C_3H_8)$ ОТ ГЕНЕРАТОРА С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Приведены результаты исследований лазера на смеси $SF_6-H_2(C_3H_8)$, накачиваемого от генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. На примере активной среды нецепного HF-лазера показаны особенности работы данного генератора на газоразрядную нагрузку. Получена энергия излучения 0,6 Дж при КПД от вложенной энергии 5,5% и полном КПД лазера (относительно энергии, запасаемой в емкостных накопителях) 3,5%. Рассмотрена возможность масштабирования лазеров данного типа на энергию излучения 1 кДж.

В последнее время значительно возрос интерес к электроразрядным HF(DF)-лазерам, возбуждение которых осуществляется за счет нецепной химической реакции [1–4]. Обычно для накачки таких лазеров используются емкостные генераторы различных конструкций. При этом эффективность HF(DF)-лазеров, как правило, ограничивается величиной $< 3\%$ из-за быстрой контракции разряда [5]. Поэтому получение однородного разряда в смесях доноров водорода или дейтерия с SF_6 имеет важное значение для улучшения параметров HF-лазеров. Данной проблеме посвящено достаточно много публикаций. Так, в [6] отмечалось значительное повышение устойчивости разряда в смеси $Ar - SF_6$ за счет интенсивной предьонизации пучком электронов. Авторы [7] для замедления контракции разряда в SF_6 предлагали покрывать электроды диэлектриком. В [3] наблюдалось повышение стабильности разряда в смеси химического лазера при использовании вместо водорода молекул C_nH_{2n+1} , $n > 3$, что снижает требования к интенсивности и однородности предьонизации. В [4] показано, что использование генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока для накачки HF значительно облегчает формирование объемного разряда в смесях, содержащих SF_6 , и увеличивает КПД нецепного химического лазера.

В данной статье, которая является продолжением публикации [4], рассматриваются особенности возбуждения HF-лазера с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и анализируются различные режимы его работы.

Схема лазера приведена на рис. 1. Цилиндрическая разрядная камера с активным объемом $1 \times 3,3 \times 55 \text{ см}^3$ (межэлектродный зазор $d = 3,3 \text{ см}$) из диэлектрика по конструкции аналогична описанной в [8]. Для предьонизации использовалось излучение барьерного разряда под сетчатым анодом. Интенсивность подсветки определялась величиной емкости C_2 . Снаружи лазерной камеры параллельно лазерному промежутку устанавливались 14 полупроводниковых диодов типа СДЛ-0,4-800 (Д). Величины емкостей и зарядное напряжение в контуре предварительного пропускания тока в прямом направлении через полупроводниковые диоды (контуре раскачки) и в основном контуре были равны $C_1 = 12\text{--}25 \text{ нФ}$ и $C_0 = 45 \text{ нФ}$, $U_1 = 25 \text{ кВ}$ и $U_0 = 15\text{--}30 \text{ кВ}$ соответственно.

Время предварительного пропускания тока через прерыватель, равное полупериоду колебания тока в контуре раскачки, было выбрано равным 800 нс, а пропускаемый ток при этом был на порядок меньше, чем в основном контуре. Импульсы тока в разрядных контурах, напряжения на лазерном промежутке и импульсы лазерного излучения регистрировались соответственно омическими шунтами, делителем напряжения и фотоприемником ФСГ-0,22, сигналы с которых подавались на осциллограф С8-14. Энергия излучения измерялась калориметром ИКТ-1Н. Рабочие смеси, состоящие из SF_6 и водорода или пропана, готовились непосредственно в лазерной камере. Резонатор был образован сферическим медным зеркалом с $R = 5 \text{ м}$ и плоскопараллельной пластинкой из КРС-5.

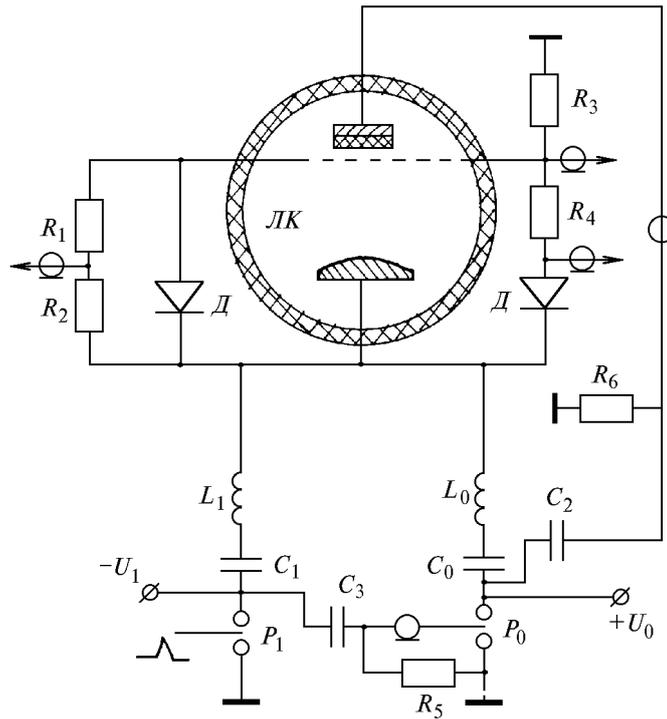
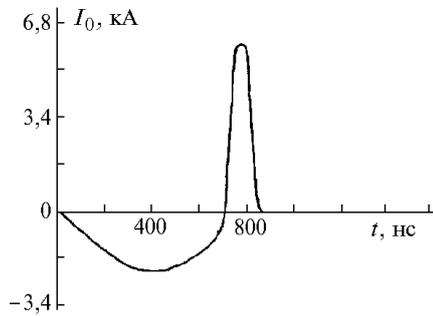
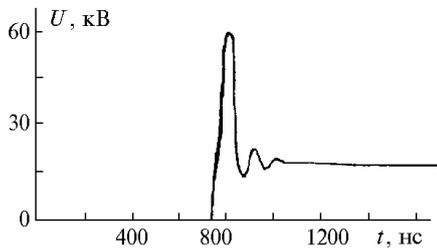


Рис. 1. Схема лазера с накачкой от генератора с индуктивным накопителем. ЛК – лазерная камера; Д – диоды СДЛ-0,4-800; P_0, P_1 – разрядники РУ-65; C_0 и C_1 – конденсаторы основного контура и контура раскачки; L_0 и L_1 – индуктивности контуров; C_2 – конденсатор для предыонизации; C_3 – конденсатор для запуска P_0 ; R_1 – R_6 – омические шунты, делитель напряжения и зарядные сопротивления

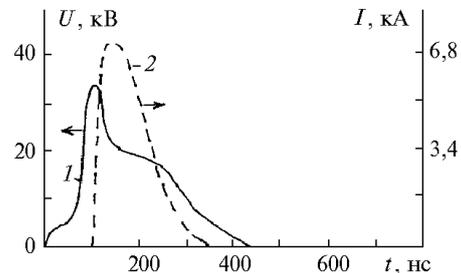


а

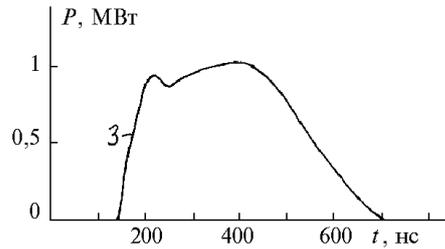


б

Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока через прерыватель (а) и напряжения на электродах лазерной камеры (б) в режиме холостого хода. $C_0 = 45$ нФ, $U_0 = 19$ кВ



а



б

Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на электродах лазерной камеры (1), тока через лазерную камеру (2) и излучения HF-лазера (3). Смесь $SF_6:C_3H_8 = 20:1$, $p = 45$ мм рт.ст., $U_0 = 25$ кВ

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов тока и напряжения на полупроводниковом прерывателе в режиме холостого тока. Полупроводниковый прерыватель в наших экспериментах срабатывал при токе до 7 кА (ток обрыва одного диода $I_d \sim 500$ А). При этом в индуктивный накопитель энергии передавалось примерно 70 % энергии, запасенной в емкостном

накопителе. Время обрыва тока не превышало 40 нс ($dl/dt \sim 100$ А/нс). Генератор формировал на лазерном промежутке импульсы напряжения с амплитудой более чем в 3 раза превышающей зарядное напряжение и скоростью нарастания до 2 кВ/нс.

Осциллограммы напряжения на лазерном промежутке, тока разряда и генерации приведены на рис. 3. Длительность импульса накачки по основанию не менялась, а его длительность на полувысоте возрастала с 75 до 110 нс при росте U_0 . После пробоя лазерного промежутка наблюдалась квазистационарная фаза разряда с $E/p = 120$ В/см \times (мм рт. ст.), где $E = U/d$ – напряженность электрического поля. Генерация начиналась через ~ 40 нс после пробоя и продолжалась примерно 500 нс. Мощность излучения в импульсе превышала 1 МВт. Отметим, что при уменьшении в смеси концентрации водорода длительность импульса генерации подобно [9] возрастала до 1 мкс.

На рис. 4 приведены зависимости энергии излучения и кпд HF-лазера от зарядного напряжения при различной интенсивности предьонизации. При $C_2 = 3,5$ нФ (величина C_2 при постоянном U_0 определяет интенсивность предьонизации) энергия излучения была больше в смесях с пропаном и достигала 0,5 Дж. При увеличении интенсивности подсветки ($C_2 = 5,5$ нФ) при прочих равных условиях энергия излучения лазера возросла до 0,6 Дж. Кроме того, при улучшении условий предьонизации удавалось значительно увеличить длительность существования объемного разряда, которая в ряде экспериментов за счет разряда емкости разгонного контура C_1 могла превышать 1 мкс. При $C_2 = 5,5$ нФ энергия излучения в смесях $SF_6 - H_2$ и $SF_6 - C_3H_8$ отличалась не более чем на 10%.

Максимальный полный кпд лазера (кпд относительно энергии, запасаемой в емкостных накопителях) составил 3,5%, что значительно выше, чем в [6] при использовании рентгеновской предьонизации и генератора накачки на основе емкостных накопителей. Увеличение полного кпд и реализация одинаковых высоких кпд в смесях $SF_6 - H_2$ и $SF_6 - C_3H_8$ обусловлены формированием однородного разряда за счет использования индуктивного накопителя энергии при высоком уровне предьонизации.

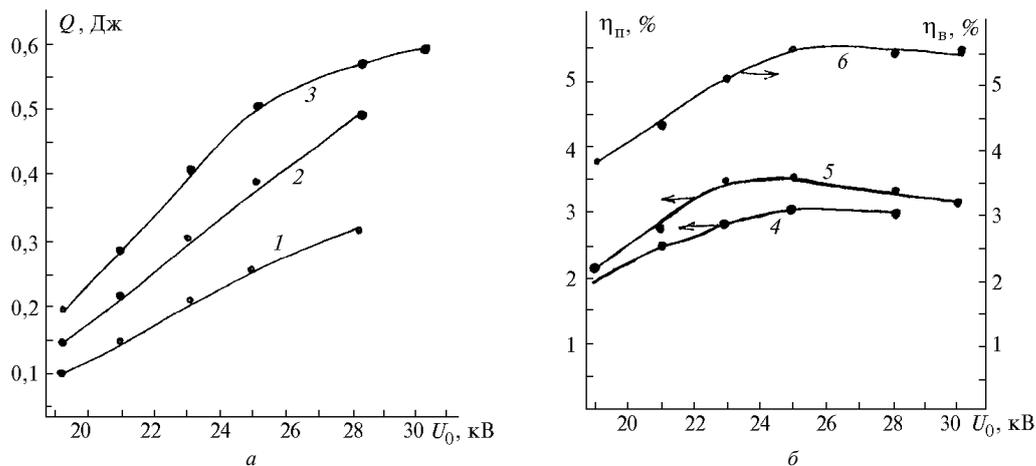


Рис. 4. Зависимости энергии излучения Q (а), полного кпд лазера $\eta_{п}$ и кпд относительно вложенной энергии $\eta_{в}$ (б) от зарядного напряжения основного емкостного накопителя C_0 . $C_2 = 3,5$ нФ (1, 2, 4) и $C_2 = 5,5$ нФ (3, 5, 6). Давление смеси $p = 45$ мм рт.ст.; 2, 3, 4, 5, 6 – смесь $SF_6:C_3H_8 = 20:1$; 1 – $SF_6:H_2 = 8:1$

На основе приведенных данных рассмотрим особенности работы генератора с индуктивным накопителем на газоразрядную нагрузку. При накачке от индуктивного накопителя скорость нарастания напряжения (и соответственно перенапряжение на лазерном промежутке в момент его пробоя) определялась скоростью срабатывания прерывателя тока и была значительно выше, чем в случае накачки лазера только от емкости C_0 . Как известно, данные параметры очень сильно влияют на устойчивость разряда в смесях SF_6 с H_2 [2]. Генератор с индуктивным накопителем обеспечивает также очень быстрое нарастание тока разряда, что, по данным [10, 11], также повышает устойчивость разряда в газовых смесях, содержащих электроотрицательные газы. Поэтому использование генератора с индуктивным накопителем существенно облегчает формирование объемного разряда, что весьма важно при масштабировании

лазера данного типа. В наших экспериментах объемный разряд без признаков контрагирования в смесях SF₆-H₂ легко зажигался при давлениях более 100 мм рт.ст.

Генератор с индуктивным накопителем формирует однополярные импульсы тока через лазерный промежуток. Действительно, изменение тока разряда индуктивного накопителя на активную нагрузку описывается выражением

$$I = I_0 e^{-R_H t/L},$$

где I_0 – начальный ток; R_H – сопротивление нагрузки. Это значит, что вся энергия, запасенная в индуктивном накопителе, будет вложена в плазму разряда при однополярном импульсе. Для генератора с емкостным накопителем согласованный режим накачки может быть реализован только при использовании сложных схем с предимпульсом [12]. В наших экспериментах КПД лазера от вложенной энергии достигал 5,5% (рис. 4,б). Видно, что данная эффективность может быть получена только при полной передаче энергии из индуктивного накопителя в газоразрядную нагрузку. Отсюда можно сделать вывод, что при накачке от индуктивного накопителя эффективность электроразрядного HF-лазера можно увеличить.

Длительность импульса накачки, формируемого генератором с индуктивным накопителем, равна $t_l \sim L_1/R_H$ и слабо меняется при увеличении размера лазера (в этом случае L_1 и R_H увеличиваются одновременно). В случае емкостного генератора $t_c \sim (L_1 C_1)^{1/2}$ и будет возрастать при масштабировании лазера. Отсюда видно, что при использовании индуктивного накопителя можно сократить длительность импульса накачки и увеличить его мощность [13]. Для условий нашего эксперимента длительность импульса возбуждения составила 200 нс при $t_c \sim (L_1 C_1)^{1/2} = 500$ нс, а пиковая мощность накачки при использовании индуктивного накопителя возросла более чем в 2 раза.

Приведенные особенности индуктивного накопителя делают его особенно перспективным при создании нецепных химических лазеров с большой энергией в импульсе. Так, например, при использовании генератора накачки с запасаемой энергией 1,5 кДж (такой энергозапас в основном накопителе был реализован в генераторе с индуктивным накопителем энергии ускорителя электронов, описанного в [14]) для возбуждения нецепного HF-лазера энергия излучения должна составить ~ 50 Дж. Увеличение энергозапаса в основном накопителе до 30 кДж (использование двух ГИНов, подобных апробированным в [15] для формирования сходящегося пучка электронов) позволит создать электроразрядный HF-лазер с энергией излучения ~ 1 кДж.

Таким образом, в данной статье сообщается о создании HF-лазера, накачиваемого от генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. На примере активной среды нецепного HF-лазера показаны достоинства данного генератора. Получена энергия излучения 0,6 Дж при КПД от энергии, запасаемой в основном накопителе, 3,5 % и КПД от вложенной энергии до 5,5 %. Показано, что преимущества генератора накачки данного типа делают его весьма перспективным при создании HF-лазеров с высокой энергией в импульсе. Генератор с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока может быть использован и для эффективной накачки активных сред других газовых лазеров. Так, например, на смеси He-CO₂-N₂ была получена энергия излучения 3,2 Дж при полном КПД лазера более 16 %.

1. Горюнов Ф.Г., Гурков К.В., Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 12. С. 1148–1150.
2. Великанов С.Д., Запольский А.Ф., Фролов Ю.Н. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 1. С. 11–14.
3. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 3. С. 213–215.
4. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 6. С. 511–512.
5. Химические лазеры / Под ред. Н.Г. Басова. М.: Наука, 1982. 400 с.
6. Бычков Ю.И., Королев Ю.Д., Месяц Г.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 21. С. 1121–1125.
7. Спичкин Г.Л. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 1923–1932.
8. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Букатый Е.В. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 12. С. 2409–2411.
9. Галь А.В., Додолов А.А., Русанов В.Д., Шираевский В.Л., Шолин Г.В. // Квантовая электроника. 1992. Т. 24. № 2. С. 159–161.
10. Литвинов Е.А., Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // ТВТ. 1985. Т. 23. Вып. 2. С. 392–394.

11. Макаров М. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. N. 6. P. 1083–1093.
12. Long W. H., Plummer J., Stappaerts E. A., et al. // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43. N. 8. P. 735–737.
13. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в силовой электронике. Новосибирск: Наука, 1987. 225 с.
14. Котов Ю. А., Месяц Г. А., Рукин С. Н., Филатов А. Л. // ДАН. 1993. Т. 330. N 3. С. 315–317.
15. Абдуллин Э. Н., Бугаев С. П., Ефремов А. М. и др. // ПТЭ. 1993. N 5. С. 138–142.

Институт силовой электроники СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
2 июня 1997 г.

E. H. Baksht, M. I. Lomaev, A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko. Peculiarities of Pumping a Laser on SF₆-H₂(C₃H₈) Mixture Using Generator with Inductive Energy Storage.

The results of investigation of non-chain HF laser pumped by a generator with inductive energy storage and semiconducting opening switch are presented. The peculiarities of operation of a generator of this type on gas-discharge load are shown using active media of non-chain HF laser as an example. Output energy of 0,6 J, the laser efficiency with respect to deposited energy of 5,5% and total efficiency (with respect to energy stored in the capacitor) of 3,5% were demonstrated. The possibility of scaling the laser output up to 1 kJ is discussed.