

04;07;10;12

## Мощный HF лазер с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов

© Э.Н. Абдуллин, А.М. Ефремов, Б.М. Ковальчук,  
В.М. Орловский, А.Н. Панченко, Э.А. Соснин,  
В.Ф. Тарасенко, А.В. Феденев

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 4 декабря 1996 г.

Сообщается о создании мощного HF лазера с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой радиально сходящимся пучком электронов. В смеси с активного объема  $\sim 30$  л получена энергия излучения  $\sim 115$  Дж при эффективности относительно вложенной энергии  $\sim 8\%$ . Показано, что при одинаковых энергозатратах благодаря высокой плотности  $SF_6$  суммарный скачок давления в смесях  $SF_6-H_2$  ( $D_2$ ) за счет инжекции электронного пучка и химической реакции в несколько раз меньше, чем в рабочих смесях эксиплексных лазеров. Последнее существенно облегчает создание широкоапертурных HF и DF лазеров с донором фтора  $SF_6$ , накачиваемых нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов.

1. Химические лазеры, в первую очередь HF лазер (длина волны излучения  $\lambda \approx 2.6-3.2$  мкм), накачиваемые как цепными, так и нецепными реакциями, исследуются с 1965 года [1]. Наиболее важные результаты, полученные до 1982 года, обобщены в монографиях [2,3]. Для инициирования химических реакций применяются электронные пучки, разряды, оптическое излучение и другие способы. Наибольшие импульсные и удельные энергии излучения получены для HF лазеров с накачкой цепными реакциями. Однако для многих практических приложений наиболее подходят химические HF и DF лазеры с накачкой нецепными реакциями, которые, хотя и имеют более низкие энергетические характеристики, более просты и безопасны при эксплуатации. В последнее время наблюдается значительное возрастание интереса к изучению химических лазеров [4-9], что обусловлено новыми возможностями использования лазеров с высокими энергетическими характеристиками в ИК области спектра.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований широкоапертурного лазера на смеси SF<sub>6</sub>-H<sub>2</sub> с накачкой радикально сходящимся электронным пучком, получена энергия излучения ~ 115 Дж при КПД от вложенной в газ энергии электронного пучка ~ 8%.

2. В экспериментах использовался компактный лазер с активным объемом ~ 30 л, на котором ранее была получена энергия излучения ~ 100 Дж на молекулах XeCl\* ( $\lambda = 308$  нм) и KrF\* ( $\lambda = 249$  нм) [10]. Ускоритель электронов с вакуумной изоляцией, формирующий радикально сходящийся электронный пучок от четырех катодов из бархата, подробно описан в [11]. Все нижеприведенные результаты получены при зарядном напряжении девятиступенчатого генератора импульсных напряжений 80 кВ, напряжении на вакуумном диоде ~ 400 кВ, токе пучка ~ 40 кА и длительности импульса тока пучка на полувысоте ~ 500 нс. В отличие от [10,11] в данной работе генератор импульсных напряжений располагался горизонтально, что позволило уменьшить высоту оптической оси до 80 см. Активный объем лазерной камеры имел длину ~ 100 см и диаметр 20 см. Рабочие смеси, состоящие из водорода и SF<sub>6</sub>, готовились в лазерной камере. Использовались несколько типов резонаторов. В качестве "глухих" зеркал применялись плоские и вогнутое сферическое Al зеркала, а также плоское зеркало с золотым покрытием; в качестве выходных — плоскопараллельные пластины из NaCl, КРС-5 КРС-6 с отражением в области ~ 3 мкм соответственно 9, 33 и 27%.

Величина энергии  $\Delta W$ , переданная в газ от электронного пучка и от химической реакции, определялась по возрастанию давления в лазерной камере после инъекции пучка [10,11]. Для регистрации скачка давления  $\Delta P$  использовался механотрон 6МДХ-3Б. Значения  $\Delta W$  рассчитывались с помощью соотношения

$$\Delta W = 0.36 \cdot \rho \cdot C \cdot V \cdot \Delta P. \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  — плотность газа при температуре 273 °К и давлении 760 мм рт.ст.,  $C$  — теплоемкость при постоянном объеме,  $V$  — объем газа. Для SF<sub>6</sub>  $\rho = 6.5$  г/л, теплоемкость при постоянном давлении  $C_1 = 0.659$  Дж/г · град [12]. Полагая  $C_1/C \approx 1.33$ , получим из (1)

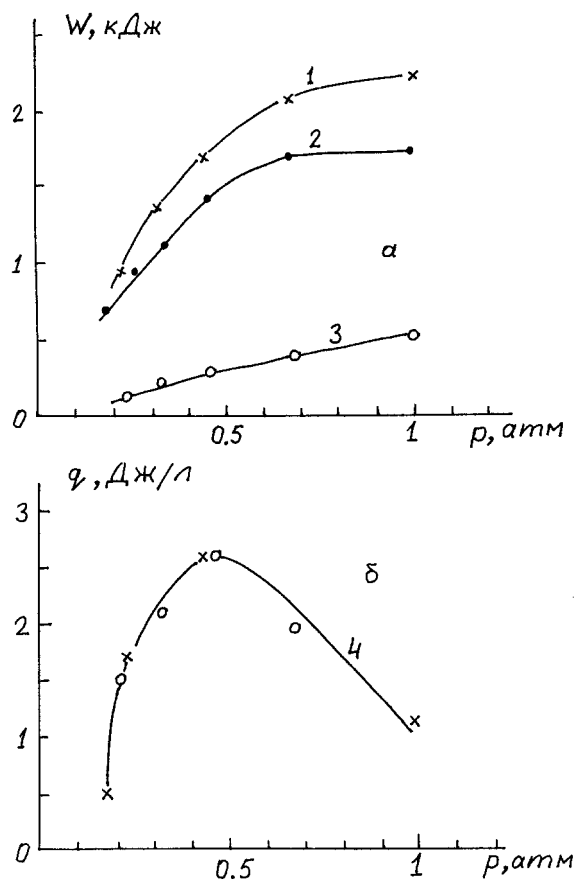
$$\Delta W = 1.15V \cdot \Delta P, \quad (2)$$

где размерности  $[\Delta W]$  в Дж,  $[V]$  в л,  $[\Delta P]$  в мм рт.ст.

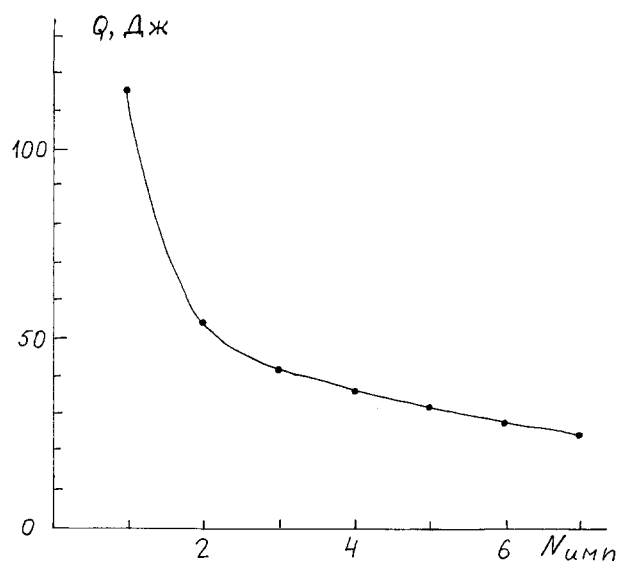
Для определения энергии излучения использовались два калориметра ИМО-2, устанавливаемых в различных точках выходного лазерного пучка, и калориметры ТПИ-2М. С помощью последних определялось распределение энергии по сечению выходного пучка при исследовании генерации ХеСl и КгF лазеров [10]. Обычно энергия излучения для смеси  $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 8:1$ , которая была оптимальной, измерялась при первом включении ускорителя одновременно двумя калориметрами ИМО-2, что позволяло определить распределение энергии излучения по сечению выходного пучка.

3. Основные результаты иллюстрируют рис. 1 и 2. На рис. 1, а приведены зависимости вложенной в газ энергии, которая определялась по скачку давления, в рабочей смеси  $\text{SF}_6\text{-H}_2$  и в чистом  $\text{SF}_6$  при увеличении давления до 1 атм. В  $\text{SF}_6$ , начиная с давления  $\sim 0.6$  атм (кривая 2), вложенная в газ энергия перестает увеличиваться, а в смеси  $\text{SF}_6\text{-H}_2$  (кривая 1) при одинаковых давлениях вложенная энергия больше и продолжает увеличиваться с ростом давления. Разность энергий (3) между кривыми 1 и 2 соответствует энергии, выделившейся за счет химической реакции. Видно, что эта энергия практически линейно возрастает с увеличением давления рабочей смеси и составляет при давлении 0.45 атм  $\sim 20\%$  от энергии, вложенной электронным пучком.

На рис. 1, б приведена зависимость удельной энергии лазерного излучения в смеси  $\text{SF}_6:\text{H}_2 = 8:1$  от давления. Резонатор, который был оптимальным для данного эксперимента, состоял из плоского "глухого" зеркала с золотым покрытием и плоскопараллельной пластинки из КРС-5, а энергия излучения измерялась на оси лазерной камеры. Ставилась задача получить наибольшую удельную энергию излучения на оси лазерной камеры. Из рис. 1, б видно, что наибольшая удельная энергия излучения на оси лазерной камеры реализуется при давлении смеси 0,45 атм. В этих условиях максимальная удельная энергия лазерного излучения регистрировалась на расстоянии 1–3 см от фольги и составляла  $\sim 5$  Дж/л, а полная энергия излучения равнялась  $\sim 115$  Дж. При увеличении давления рабочей смеси от 0.45 атм до 1 атм увеличиваются энергия, вложенная в газ от химической реакции (в  $\sim 2$  раза), и энергия, вложенная за счет пучка электронов (на  $\sim 20\%$ ), а также полная энергия излучения и удельная энергия излучения в прифольговой области. Однако при этом распределение энергии излучения по выходному пучку лазера становится более неоднородным и для различных областей активного объема (пристеночной и осевой) надо было использовать выходные



**Рис. 1.** Зависимости вложенной в газ энергии (а) и удельной энергии излучения на оси лазерной камеры (б) от давления смеси  $\text{SF}_6 : \text{H}_2 = 8 : 1$  (1,3,4) или  $\text{SF}_6$  (2): 1 — суммарный энерговклад пучка электронов и химической реакции; 2 — энерговклад от пучка электронов; 3 — энерговклад от химической реакции.



**Рис. 2.** Зависимость энергии лазерного излучения от номера импульса на одной порции смеси  $SF_6:H_2 = 8:1$  при давлении 0.45 атм.

зеркала с сильно отличающимися коэффициентами отражения. Оценки показывают, что при давлении рабочей смеси  $\sim 1$  атм и неравномерном распределении энергии излучения по выходному пучку лазера полная энергия лазера должна составлять  $\sim 200$  Дж.

На рис. 2 приведена зависимость энергии излучения на одной порции рабочей смеси от номера импульса. Максимальные энергии излучения и эффективности, как и следовало ожидать, реализуются в первом импульсе. При последующих включениях ускорителя, начиная с третьего импульса, уменьшение энергии лазерного излучения от импульса к импульсу не превышает 20%.

Важная особенность рабочей смеси HF и DF химических лазеров, накачиваемых нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов в смесях с  $SF_6$ , это — сравнительно малый скачок давления в газе при инжекции электронного пучка и протекании химической реакции. Так, при давлении смеси  $SF_6 : H_2 = 8 : 1 \sim 1$  атм скачок давления составил всего 0.046 атм. Тогда как, например, для аргона

(буферный газ у большинства эксиплексных и эксимерных лазеров с накачкой пучком электронов; плотность газа  $\rho = 1.78$  г/л; теплоемкость  $C = 0.519$  Дж/г · град [12]) давление в лазерной камере существенно увеличивается и может приводить к разрыву разделительной фольги. Полагая, что в аргоне  $C_1/C \approx 1.67$ , получим из (1) для данного лазера

$$\Delta W = 0.2V \cdot \Delta P. \quad (3)$$

То есть скачок давления при одинаковых энергозатратах в аргоне будет почти в шесть раз больше, чем в SF<sub>6</sub>.

4. Таким образом, в данной работе проведены исследования широкоапертурного HF лазера с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой радиально сходящимся пучком электронов. При не более чем двухкратной разнице плотности энергии излучения в сечении выходного пучка лазера получена энергия в импульсе  $\sim 15$  Дж при КПД от вложенной энергии  $\sim 8\%$ . Показано, что благодаря высокой плотности SF<sub>6</sub> суммарный скачок давления за счет инжекции электронного пучка и химической реакции в несколько раз меньше, чем в рабочих смесях эксиплексных лазеров. Последнее существенно облегчает создание широкоапертурных HF и DF лазеров с донором фтора SF<sub>6</sub>, накачиваемых нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов. Можно прогнозировать, что при использовании широкоапертурного лазера с активным объемом 600 л и накачкой радиально сходящимся электронным пучком [11,13], созданного в Институте сильноточной электроники СО РАН, будет получена энергия излучения в ИК области спектра на смесях SF<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>(D<sub>2</sub>) более 1 кДж.

## Список литературы

- [1] Kasper J.V., Pimentel G.G. // Phys. Rev. Lett. 1965. V. 14. N 10. P. 352–354.
- [2] Химические лазеры / Под ред. Р. Гросса и Дж. Ботта. М.: Мир, 1980. 832 с.
- [3] Бакиин А.С., Игошин В.И., Ораевский А.Н., Щеглов В.А. Химические лазеры. М.: Наука, 1982. 400 с.
- [4] Barmshenko B.D., Elijor A., Lebiush E., Rosenueaks S. // of Appl. Physics. 1994. V. 75. N 12. P. 7653–7665.
- [5] Галаев И.И., Конкин С.В., Латышев А.Д., Мороз М.В., Ребонэ В.К., Ротынян М.А., Томашевич Н.Н., Третьяков Р.Е., Федоров И.А. // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 3. С. 217–221.

- [6] *Gastaud M., Bouesc J., Autric M.* // Technical Digest "11 International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers" and "High Power Laser Conference" (GCL/HPL'96). Edinburg, 1996. P. 62.
- [7] *Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.В., Довгий А.Я., Подавалов А.М., Синьков С.Н., Фролов Ю.Н., Шереметьев Ю.Н., Щуров В.В.* // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 2. С. 119–121.
- [8] *Башкин А.С., Борейко А.С., Лебачев В.В., Мошков В.П., Федоров И.А.* // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 5. С. 428–432.
- [9] *Александров Б.П., Степанов А.А., Щеглов В.А.* // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. С. 490–494.
- [10] *Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П., Ефремов А.М., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Логинов С.В., Месяц Г.А., Толкачев В.С., Щанин П.Н.* // ПТЭ. 1993. № 5. С. 138–142.
- [11] *Абдуллин Э.Н., Горбачев В.И., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Феденев А.В., Фомин Е.А., Щанин П.Н.* // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 7. С. 652–655.
- [12] *Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.*
- [13] *Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В.* // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 6. С. 504–506.