

ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫЙ КrF ЛАЗЕР С УДЕЛЬНЫМ ЭНЕРГОСЪЕМОМ ДО 60 Дж/л

А.Д. Клементов, Н.В. Морозов, П.Б. Сергеев

Экспериментально продемонстрирована возможность работы электронно-пучкового КrF лазера с удельным энергосъемом до 60 Дж/л. Показано, что КПД рабочей газовой смеси Ar/Kr/F₂ выше, чем Kr/F₂. Построена зависимость оптимального содержания F₂ в рабочей газовой смеси от удельного энерговклада накачки при его изменении вплоть до 1,1 Дж/см³.

В работе /1/ было показано, что на лазерной электронно-пучковой установке ЭЛ-1 в прифольговой области наблюдается рост энергии генерации КrF лазера (КrF-ЭПЛ) с ростом давления рабочей газовой смеси (РГС) до ~ 4 атм. Неопределенность объема активной области не позволила точно установить удельный энергосъем из этой зоны и КПД среды в ней. Под КПД понимается отношение энергии генерации к энергии накачки, введенной в активную область. При исследовании ХеСl-ЭПЛ /2/ выяснилось, что в этой зоне можно получать энерговклад от электронного пучка в аргон до ~ 0,2 Дж/см³·атм. Изучение работы КrF-ЭПЛ при таких параметрах возбуждения также представляет значительный интерес.

Активная область в данных экспериментах, как и в /2/, ограничивалась установкой стальной пластины вблизи фольги, через которую электронный пучок (ЭП) вводился в лазерную камеру (ЛК). Размер области вдоль направления распространения ЭП 1,3 см, ширина — 4 см, длина — 23 см и объем — 120 см³. Используемые плоские зеркала резонатора крепились на ЛК, расстояние между ними составляло 35 см.

Характерная форма импульсов мощности накачки от ЭП представлена на рис. 1а. Их длительность на полувысоте составляет 75 нс. В РГС Ar/Kr = 10/1 удельная мощность накачки W была 4–3 МВт/см³·атм при давлении $P = 1-3$ атм и ~ 2,2 МВт/см³·атм при $P = 4-6$ атм. Возрастание W при низких давлениях обусловлено вкладом в накачку электронов пучка, отраженных от стального экрана. При $P = 6$ атм W составляла 13 МВт/см³, а удельный энерговклад $E_n = 1$ Дж/см³.

При использовании смеси Kr/F₂ W на единицу давления возрастала в 1,9 раза по сравнению с W в Ar/Kr/F₂ и составляла ~ 4,2 МВт/см³·атм ($P(Kr) = 2-4$ атм). Энерговклад при давлении криптона 4 атм достигал 1,1 Дж/см³, $W = 15$ МВт/см³.

РГС приготавливалась непосредственно в ЛК, одна заправка использовалась для 4–6 импульсов. Использовались благородные газы марки "ВЧ", фтор содержал до 1,5–2% HF и O₂. Энергия лазерного излучения измерялась калориметрами БКДМ (производство ОКБ ФИАН), а форма импульсов мощности регистрировалась с помощью фотозлемента ФЭК 22СПМ-У на осциллографе СУР1 с разрешением не хуже 3 нс. Характерная осциллограмма этих импульсов показана на рис. 1б. В большинстве экспериментов их форма была близка к прямоугольной, а длительность колебалась от 70 до 100 нс, в зависимости от давления РГС и прозрачности резонатора.

На рис. 2 представлены зависимости выходной лазерной энергии E и КПД среды η КrF-ЭПЛ от давления РГС Ar/Kr/F₂ = 320/32/1 (А) и Kr/F₂ = 220/1 (Б). Крестиками обозначены экспериментально полученные значения лазерной энергии на оптимальном по прозрачности резонаторе и оптимизированном при данном давлении РГС парциальном давлении F₂. Кружками показаны значения КПД среды при соответствующих давлениях. Ошибка в измерениях энергии лазерного излучения не превышает 20%, а КПД среды — 30%.

На газовой смеси Ar/Kr/F₂ при давлении 5 атм была зарегистрирована максимальная в этих экспериментах энергия генерации 7,4 Дж. В общепринятых единицах это соответствует удельному энергосъему 60 Дж/л, что в полтора раза выше рекордных значений, достигнутых ранее /3/. КПД среды имел максимальное значение 6% при $P = 3-4$ атм, что примерно в 1,6 раза меньше, чем в /3/.

На РГС из Kr/F₂ наибольшая лазерная энергия 3,6 Дж получена при давлении 2 атм, КПД достигал максимального значения 4% при 1,5 атм. Отметим, что на этой РГС по сравнению с Ar/Kr/F₂ при одинаковых W и E_n всегда наблюдается несколько меньший КПД среды.

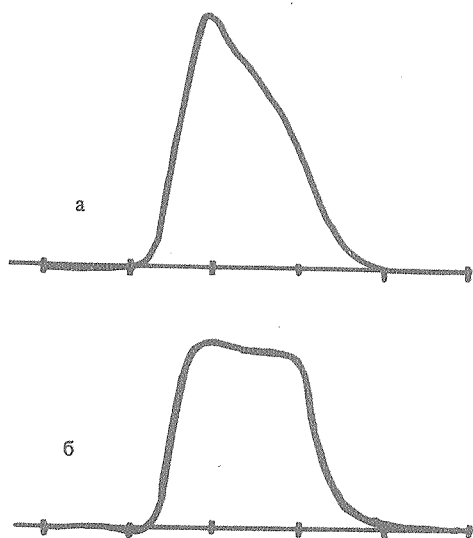


Рис. 1

Рис. 1. Осциллограммы импульсов мощности электронного пучка (а) и лазерного излучения (б). 1 деление = 50 нс.

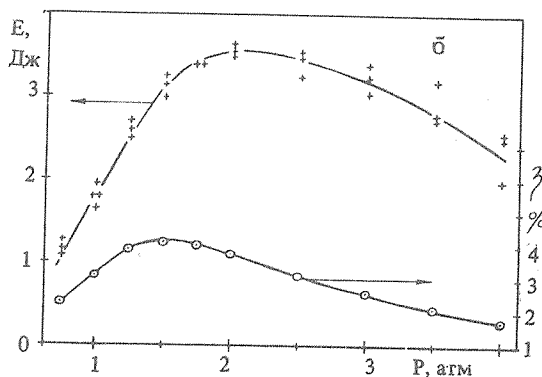
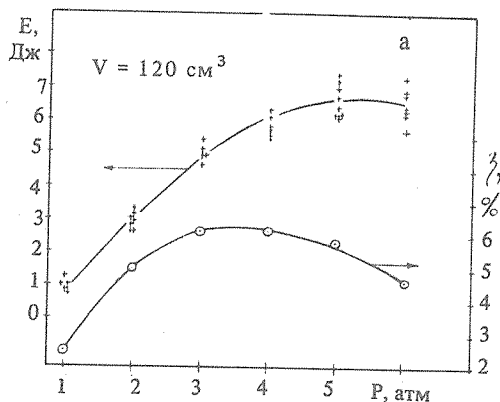


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость энергии генерации KrF-ЭПЛ от давления рабочей газовой смеси Ar/Kr/F₂ = 320/32/1 (А) и Kr/F₂ = 220/1 (Б).

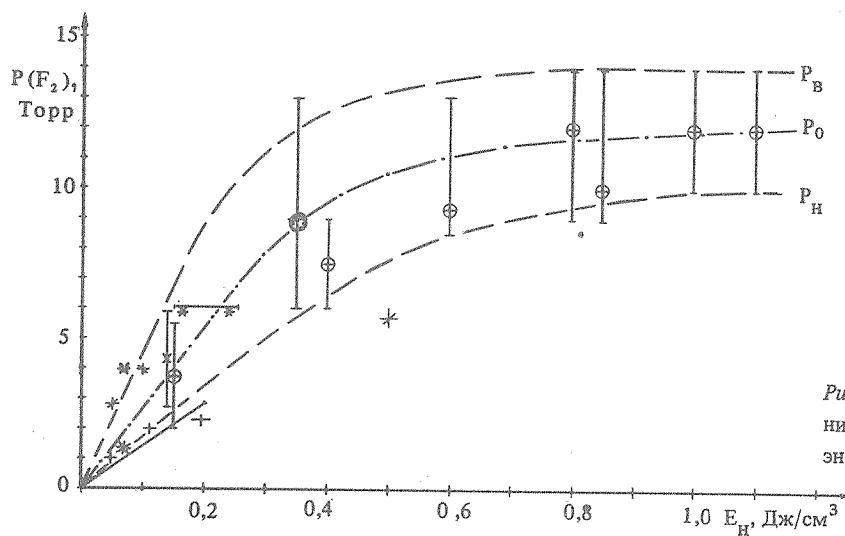


Рис. 3. Зависимость оптимального содержания P₀(F₂) в РГС KrF-ЭПЛ от удельного энерговклада накачки.

Достигнутые в данных экспериментах максимальные E_H почти вдвое превышают ранее использовавшиеся. Согласно /1/, E_H определяет оптимальное содержание $P_0(F_2)$ в РГС. Результаты по оптимизации $P(F_2)$ при различных давлениях РГС позволили построить зависимость $P(F_2)$ от E_H (последний изменялся вплоть до ~ 1 Дж/см³), показанную на рис. 3. Отрезки с кружками — результаты настоящей работы. Положение кружка указывает $P(F_2)$ при котором наблюдалась максимальная лазерная энергия (E), длина отрезка определяет диапазон изменения $P(F_2)$, при котором E падает до 0,9 от максимального значения. На рис. 3 собраны также результаты ряда других работ /1,3–11/.

Отрезок прямой, выходящей из начала координат, отражает зависимость количества "выгоревшего" F_2 , т.е. продиссоциировавшего к концу импульса накачки, от E_H /7/. На участке до $0,2 \text{ Дж/см}^3$ она описывается выражением: $P_B(F_2) = 15E_H$.

На рис. 3 две пунктирные кривые показывают нижнюю (P_H) и верхнюю (P_B) границы оптимального диапазона изменения $P(F_2)$. Нижняя, как известно /1/, определяется частичным выгоранием F_2 , и поэтому, как и P_B , вначале она линейно зависит от E_H : $P_H(F_2) = 18E_H$.

Начиная с $8 \div 9$ торр зависимость P_H от E_H резко ослабевает. Аналогично ведет себя и P_B , но с перегибом в области ~ 10 торр. P_B связана с удельной мощностью накачки. В данном случае она построена по экспериментальным результатам, полученным при длительности импульсов $50\text{--}80$ нс.

Штрих-пунктирная кривая — зависимость $P_0(F_2)$ от E_H — построена на основе усреднения всех представленных на рис. 3 экспериментальных результатов. При $P_0 \leq 8\text{--}9$ торр справедливо соотношение /1/: $P_0(F_2) = 30E_H$. Далее наблюдается резкий загиб. Область перегиба с хорошей точностью можно определить из условия:

$$N_F K_F \tau = 1, \quad (1)$$

где N_F — концентрация F_2 , $[\text{см}^{-3}]$, $K_F = 7 \cdot 10^{-10} [\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}]$ — константа скорости тушения KrF^* молекулами F_2 , $\tau = 7$ нс — радиационное время жизни KrF^* . Аналогичное поведение зависимости $P_0(F_2)$ от E_H наблюдалось и для ArF -ЭПЛ /12/, на основе чего можно предположить, что это общая для всех ЭПЛ на галогенидах благородных газов закономерность, а область перегиба определяется соотношением (1).

Таким образом, была продемонстрирована возможность работы KrF -ЭПЛ с удельным энергоъемом до 60 Дж/л . Показано, что КПД среды выше у газовой смеси Ar/Kr/F_2 по сравнению с Kr/F_2 . Построена зависимость оптимального содержания F_2 в РГС от удельного энерговклада накачки при его изменении вплоть до $1,1 \text{ Дж/см}^3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бучнев В. М. и др. Квантовая электроника, 8, 1235 (1981); 10, 2048 (1983).
2. Клементов А. Д. и др. Квантовая электроника, 12, 1607 (1985).
3. Rice J. K. et al. IEEE J.; QE-16, 1515 (1980).
4. Edwards C. B. et al. Appl. Phys. Lett., 36, 617 (1980).
5. Kannari F. et al. J. J. Appl. Phys., 22, L739 (1983).
6. Oomen G., Wittman W. J. Optics commun., 32, 461 (1980).
7. Klimek D. E. et al. IEEE J., QE-17, 1847 (1981).
8. Mandl A. et al. J. Appl. Phys., 55, 3940 (1984).
9. Swingl J. C. et al. J. Appl. Phys., 52, 91 (1981).
10. Lacin W. B., Sohn D. B. Appl. Phys. Lett., 32, 1061 (1978).
11. Артеев М. С. и др. Известия АН СССР, сер. физ., 48, 2321 (1984).
12. Клементов А. Д. и др. Квантовая электроника, 13, 1706 (1986).

Поступила в редакцию 3 сентября 1986 г.