

4

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

И Я Ф 45 - 72

В.Ф.Жаров, В.К.Малиновский, Ю.С.Неганов,

Г.М.Чумак

**О ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ
ГЕНЕРАЦИИ В СМЕСИ $F_2 + H_2$ ПУЧКОМ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**

Новосибирск

1972

В.Ф.Жаров, В.К.Малиновский Ю.С.Неганов

Г.М.Чумак

О ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ
ГЕНЕРАЦИИ В СМЕСИ $F_2 + H_2$ ПУЧКОМ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе изложены результаты экспериментального исследования энергетических характеристик модели лазера на смеси $F_2 + H_2$ при инициировании реакции электронным пучком. Показано, что отношение энергии лазерного излучения к энергии, инициирующей реакцию, равно $1,5 + 1,8$ в диапазоне рабочих давлений смеси $200 + 600$ тор. Результаты эксперимента совпадают с оценками, учитывающими доминирующую роль вторичных электронов в диссоциации фтора. Для приготовления стабильной смеси $F_2 + H_2$ при названных выше давлениях использована техника низких температур.

Возможность создания импульсных химических лазеров, продемонстрированная в ряде работ [1-3], создала предпосылки для исследования вопроса о перспективах роста энергии и мощности подобных лазерных систем. Естественно, что для получения предельно больших энергетических параметров лазера необходимы объемы и давления рабочей среды, значительно превышающие использовавшиеся в лабораторных экспериментах. Принципиально важным в этом случае становится вопрос о способе инициирования реакции.

Имеющиеся к настоящему времени экспериментальные данные (по опубликованным работам) относительно энергетических и временных характеристик импульсного химического лазера на смеси $F_2 + H_2$ сводятся к следующему [4,5].

При инициировании реакции импульсным фотолизом (лампы-вспышки, вторая гармоника рубинового лазера, работающего в режиме модулированной добротности) оказалось:

- а) квантовый выход генерации ~ 200 при давлениях смеси 1:400 тор ($P_{F_2} \approx P_{H_2}$);
- б) КПД по отношению к энергии, затраченной на диссоциацию фтора, больше 1 (~ 20);
- в) длительность импульса генерации ($\tau_{\text{ген}}$) превышает длительность инициирующего импульса ($\tau_{\text{имп}}$) в 4-200 раз ($\tau_{\text{имп}} \sim (5 \cdot 10^{-3} + 1) \cdot 10^{-5}$ сек; $\tau_{\text{ген}} \sim (4; 4) \cdot 10^{-5}$ сек).

Длительность импульса генерации ($\tau_{\text{ген}}$) при инициировании светом с $\tau_{\text{имп}} \sim 10^{-4}$ сек как правило не превышает 10^{-5} сек. Это связано с тем, что смесь быстро разогревается как во время диссоциации фтора (в реакции $F_2 + h\nu \rightarrow 2F + E_1$, атом фтора рождается "горячим"), так и в процессе химической реакции $F_2 + H_2 \rightarrow 2HF + E_2$ в силу экзотермичности. Рост температуры приводит к резкому увеличению скорости химической реакции, но одновременно растут и скорости релаксационных процессов.

На рис.1, заимствованном из работы [6] показано, как меняется время колебательной релаксации активных продуктов реакции с ростом температуры. При давлениях смеси $p \sim 1$ атм и $T \sim 1000^\circ K$ время колебательной релаксации $HF(v=1) + HF(v=0) \rightarrow 2HF(v=0) + E_3$, порядка 10^{-7} сек. Из этого следует, что для достижения предельных выходных параметров необходимо обеспечить диссоциацию фтора за времена, меньшие чем 10^{-7} сек. В случае, когда давления и

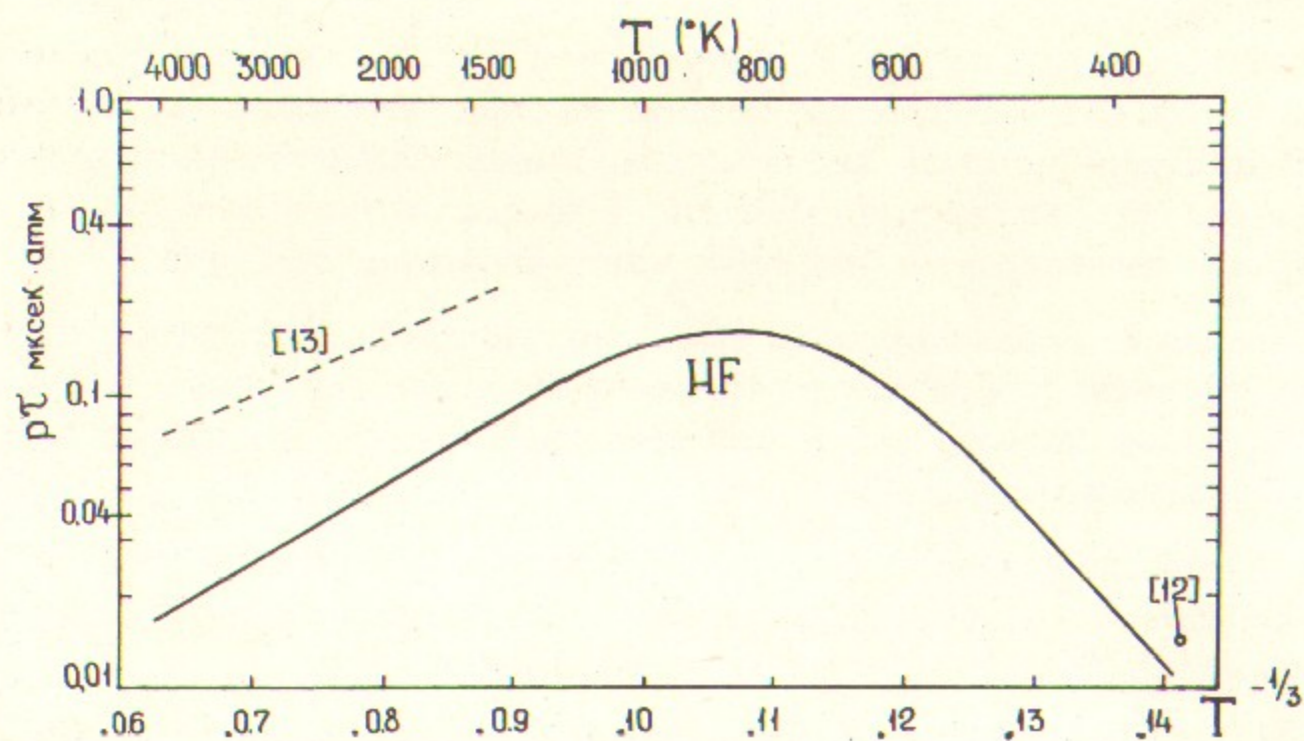


Рис.1. Колебательная релаксация молекул фтористого водорода в собственном газе. — теория / 8 /, — — —, о — эксперимент.

объемы рабочей смеси велики ($pV \approx 10^6 \text{ см}^3 \cdot \text{атм}$) обеспечение необходимой мощности источника световой накачки в нужном спектральном интервале становится проблематичным.

Достигнутые в последнее время успехи в получении мощных импульсных пучков электронов ($U \sim 10^6 \text{ в}$, $I \sim 10^6 \text{ а}$, $t \sim 10^{-7} \text{ сек}$) могут быть использованы в лазерной технике. Преимущества инициирования химической реакции электронным пучком сводятся к возможности создания равномерного инициирования в большом объеме ($V \approx 10^6 \text{ см}^3$) и при больших давлениях ($p \approx 1 \text{ атм}$) за относительно короткие времена ($\tau \sim 10^{-7} \text{ сек}$).

Ниже мы рассмотрим возможность использования пучка релятивистских электронов для возбуждения реакций $F_2 + H_2$ и обсудим результаты модельного эксперимента.

Экспериментально установлено, что при одном столкновении быстрый электрон теряет в газовой среде энергию $30 + 100 \text{ эв}$. Эта энергия расходуется в основном на ионизацию, поскольку для быстрых электронов ($E \approx 1 \text{ Мэв}$) сечение ионизации максимально по сравнению с сечениями других элементарных процессов. Возбуждение

же отдельных переходов и диссоциация молекул осуществляются главным образом за счет вторичных электронов.

Число вторичных электронов с энергией между E и $E+dE$ на 1 см пути равно

$$dn = K \frac{dE}{E^2}$$

где E — энергия вторичного электрона,

K — коэффициент, зависящий от скорости первичного электрона, плотности газа и конкретной структуры оболочек атома или молекулы /7/.

Нетрудно видеть, что энергетический спектр вторичных электронов имеет максимум в области низких энергий. С ростом энергии вторичных электронов их количество уменьшается примерно как $1/E^2$.

Характер взаимодействия молекул фтора с электронами различных энергий отражен на рис.2 /8/. При низких энергиях ($E \sim 1,3 \text{ эв}$) сечение образования атомарного фтора в процессе $F_2 + e \rightarrow F^- + F$ максимально ($\sigma \sim 10^{-16} \text{ см}^2$). С ростом энергии электронов преобладающим становится процесс $F_2 + e \rightarrow F^- + F^+ + e$:

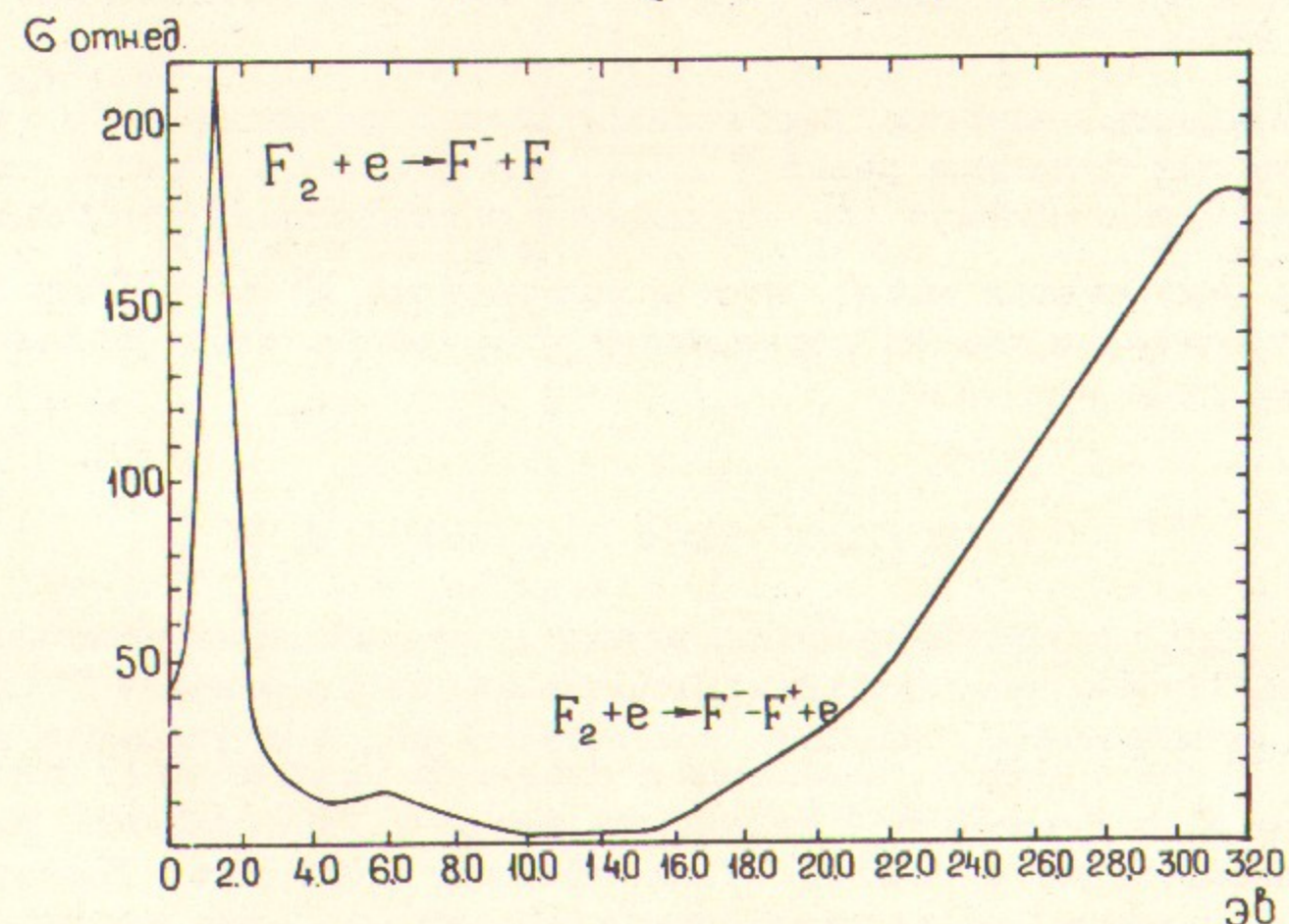


Рис.2. Сечение взаимодействия электронов с фтором. Эксперимент / 8 /.

В наших экспериментах использовался электронный пучок с параметрами: $E=2$ Мэв, $I=4$ ка $t=6 \cdot 10^{-8}$ сек. Оценим полное число вторичных электронов из условия

$$n = \frac{I t}{e} \alpha$$

где I - полный ток пучка

t - длительность импульса

e - заряд электрона.

α - число пар ионов, образованных быстрым электроном на 1 см пути в среде.

Если $p=0,3$ атм ($0,5 F_2 ; 0,5 N_2$), то $\alpha \approx 30$ и $n \sim 10^{16} \frac{1}{\text{см}}$.

Используя данные рис.2 можно предположить, что количество атомарного фтора имеет тот же порядок величины. Потеря энергии электронного пучка при этом составляет $3 \cdot 10^{-2}$ дж.

Известно, что длина цепи химической реакции не зависит от способа получения активного центра / 9 /. Это позволяет провести сравнение эффективностей образования активного центра реакции (атомарного фтора) в процессе фотолиза и при взаимодействии с электронами.

Количество энергии, необходимое для образования 10^{16} атомов фтора при фотолизе равно $7 \cdot 10^{-3}$ дж (область спектра сплошного поглощения молекул F_2 находится в диапазоне $\lambda = 2500:3500 \text{ \AA}$)

Из этих оценок видно, что эффективность использования энергии электронного пучка на образование атомарного фтора сравнима с эффективностью фотолиза.

МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис.3 показана принципиальная схема экспериментальной установки. Пучок релятивистских электронов из ускорителя РИУС-5 (энергия электронов = 2 Мэв, ток пучка 4 кА, длительность импульса $t = 6 \cdot 10^{-8}$ сек) вводился в лазерную полость (1) перпендикулярно её оси через две титановые фольги (7) толщиной 50 мкм. Длина активной части кюветы 5 см, сечение 1,5х1,5 см. Кювета изготовлена из меди. Её конструктивное оформление ясно из рис.4. Внутренняя камера охлаждалась жидким азотом до температуры

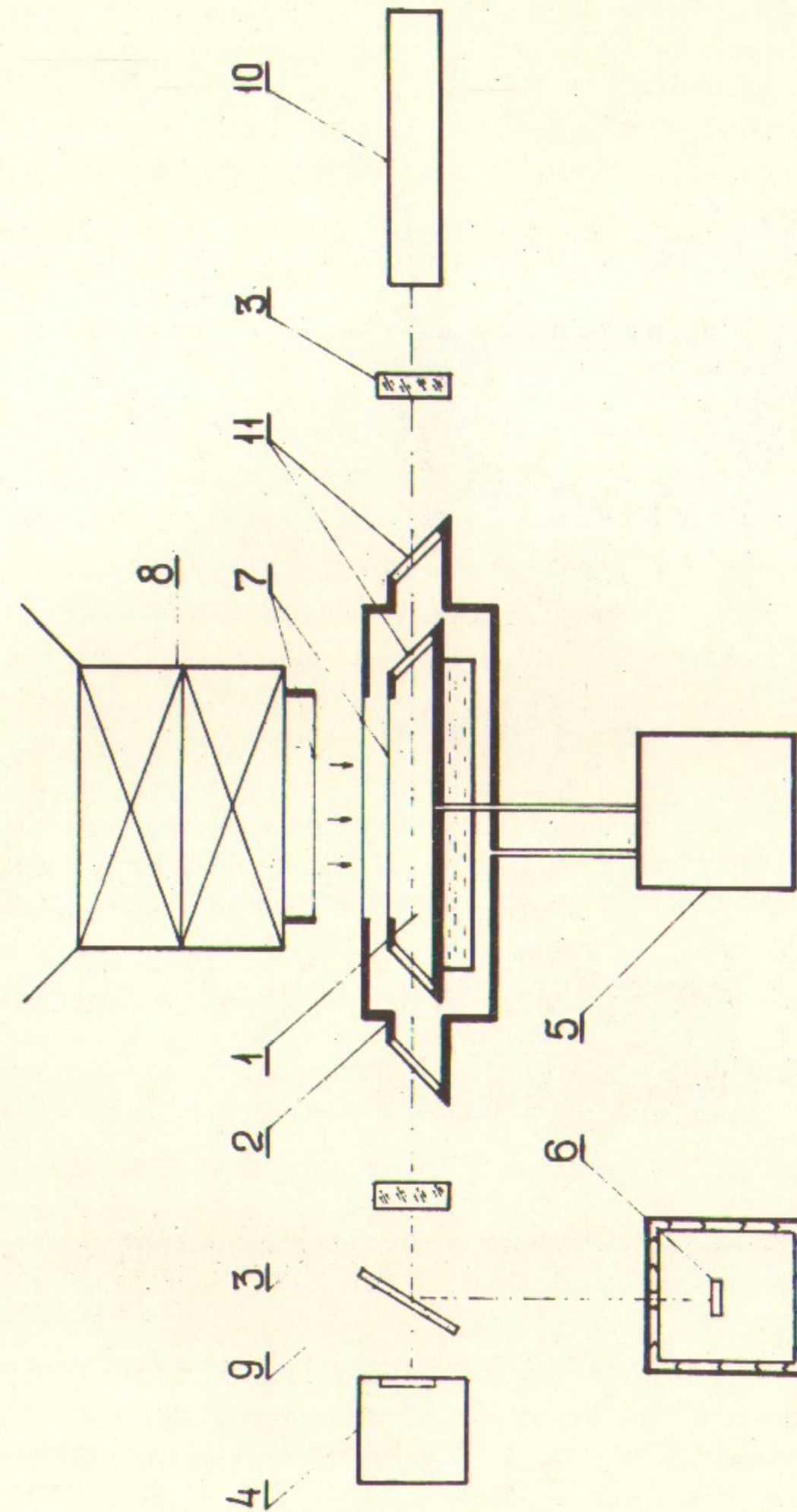


Рис.3. Схема установки

1 - лазерная полость, 2 - наружная камера, 3 - герметичная пластина, 31 - глухое зеркало, 4 - калориметр ИЭК-1, 5 - система напуска и откачки смеси газов, 6 - детектор Ge·Ac, 7 - титановая фольга, 8 - магнитная линза ускорителя, 9 - плоскопараллельная кварцевая пластина, 10 - юстировочный лазер ЛГ-126, 11 - окна из флюорита.

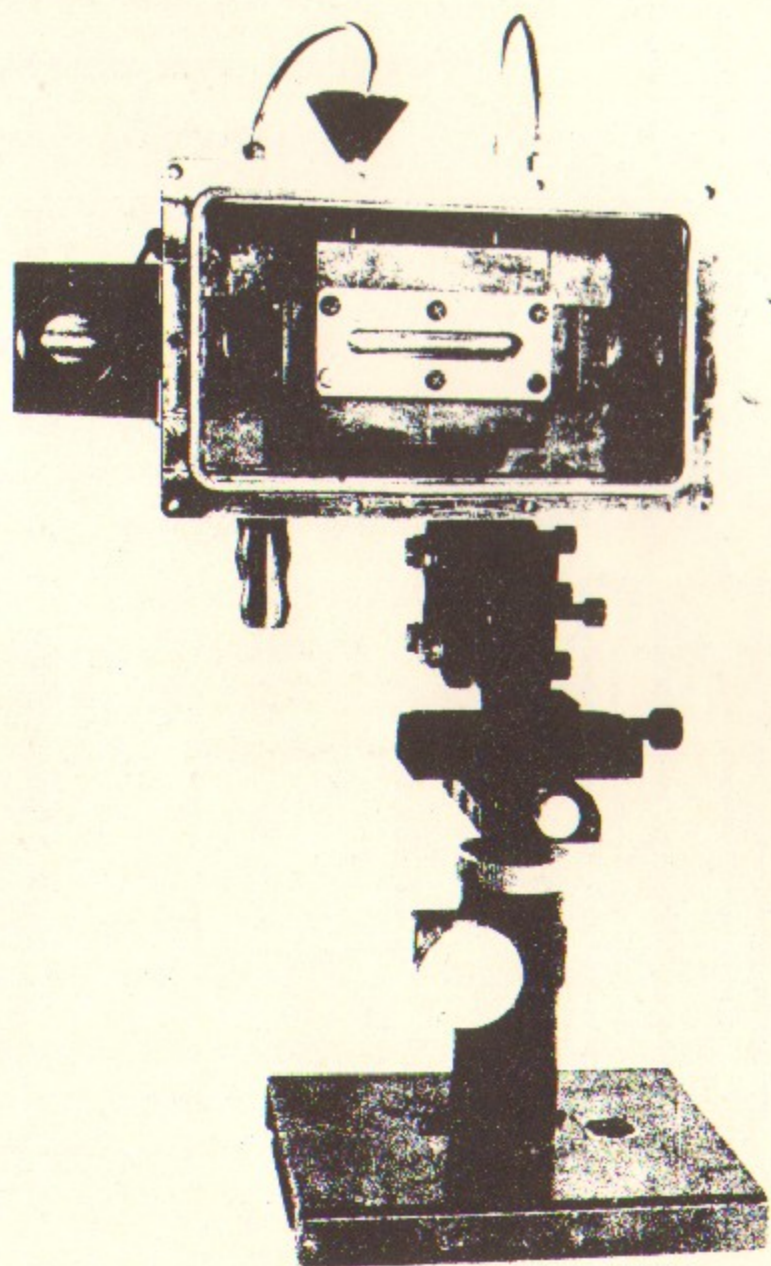


Рис.4. Лазерная кювета со снятой крышкой вакуумной рубашки.

$150 \pm 100^\circ\text{K}$ и изолировалась от окружающей среды с помощью вакуумной рубашки для защиты окон кюветы, изготовленных из флюорита (11), от конденсации атмосферной влаги. При температуре $150^\circ > T > 100^\circ\text{K}$ смесь фтора с водородом оставалась стабильной до давлений 600 тор. Скорость напуска в кювету предварительно охлажденных до той же температуры фтора и водорода определялась конструкцией газовой системы и не превышала 10 тор/сек.

Оптический резонатор состоял из сферического ($R \sim 2\text{ м}$) глухого зеркала, напыленного золотом (3) и германиевой пластинки (3¹).

Основная доля лазерного излучения регистрировалась калориметром ИЭК-1 (4). Плоскопараллельная пластинка из кварца (9) ответвляла часть излучения на детектор из $\text{Ge}\cdot\text{Au}$, защищенный от паразитного γ -излучения свинцовым домиком (6). Сигнал с детектора регистрировался осциллографом С-1-29. Постоянная времени измерительной схемы 10^{-6} сек.

Юстировка оптической системы проводилась с помощью лазера ЛГ-126 на двух длинах волн ($\lambda_1 = 0,63\text{ мк}$, $\lambda_2 = 3,39\text{ мк}$).

На рис.5. показан типичный вид импульса генерации при суммарном давлении смеси $\text{F}_2 + \text{H}_2 \sim 400\text{ тор}$ ($P_{\text{F}_2} \approx P_{\text{H}_2}$). Длительность импульса генерации $20 \cdot 10^{-6}$ сек. Порог генерации достигается при давлении смеси $\sim 150 \pm 200\text{ тор}$. Вблизи порога параметры импульса генерации нестабильны и чувствительны к флуктуациям параметров электронного пучка. В тех случаях, когда давления смеси превышали пороговое, воспроизводимость от импульса к импульсу была хорошей.

На рис.6 приведена зависимость энергии лазерного излучения от давления исходной смеси. Линейный характер этой зависимости свидетельствует о том, что энергия лазерного излучения прямо пропорциональна поглощенной в смеси энергии пучка.

Выше 600 тор подняться по давлению не удалось. После бомбардировки электронами ухудшается, по-видимому, пассивировка стенок кюветы. Это приводит к случайным взрывам смеси (ни калориметр, ни детектор $\text{Ge}\cdot\text{Au}$ не фиксирует лазерного излучения). Окна кюветы покрываются в таких случаях непрозрачным для видимого и инфракрасного излучения налетом.

Потери энергии электронного пучка в титановых фольгах, развязывающих реакционный объем от внешней среды, определялись

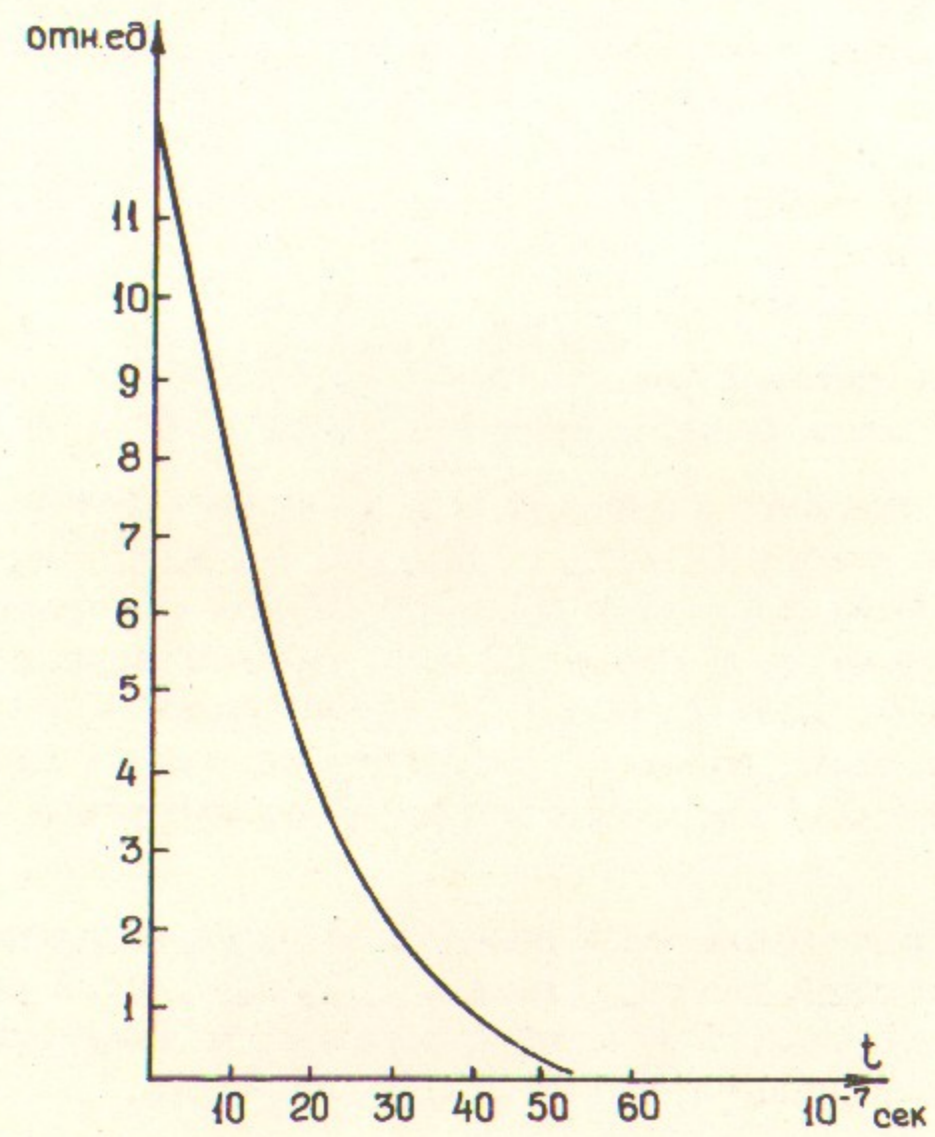


Рис.5. Импульс генерации при давлении смеси 400 тор.

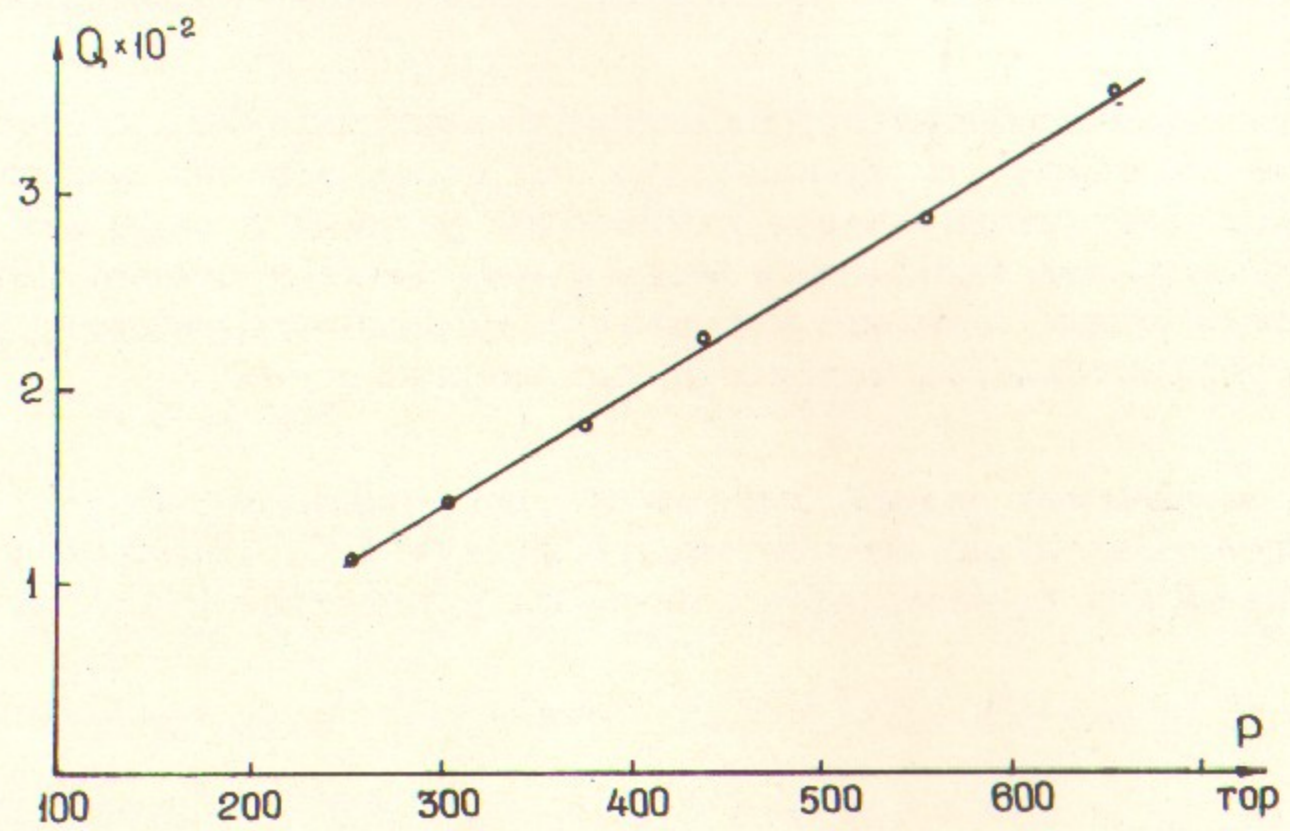


Рис.6. Энергия генерации при различных давлениях смеси $F_2 + H_2$.

экспериментально. Для этого камера заменялась толстым листом дюрала, в котором с соблюдением полного геометрического подобия прорезалось окно, закрытое с двух сторон титановыми фольгами. На выходе калориметр фиксировал энергию прошедшего пучка. Оказалось, что около 30% от полной энергии пучка доходит до реакционного объема. С учетом этих потерь отношение энергии лазерного излучения ($Q_{\text{л}}$) к энергии пучка, поглощенной в активной среде ($Q_{\text{пол}}$), было $1,5 + 1,8$. Количество поглощенной в активной среде энергии вычислялось по известной плотности смеси и энергии электронов.

Важно отметить, что в исследованном диапазоне давлений ($200 + 600$ тор) энергетический к.п.д. = $Q_{\text{л}} / Q_{\text{пол}}$ оставался постоянным. Полученное нами абсолютное значение к.п.д., видимо, не максимально, поскольку не предпринималось мер к оптимизации резонатора.

Суммируя изложенное, отметим, что проведенные эксперименты свидетельствуют о перспективности использования электронных пучков для инициирования химических реакций в лазерных средах. Исследование конкретных механизмов реакций, приводящих к диссоциации фтора, позволит, по-видимому, создать условия, улучшающие эффективность использования энергии пучка.

В заключение авторы выражают свою признательность Г.Г.Долгову-Савельеву за постановку задачи и С.Б.Вассерману за предоставленную возможность работы на ускорителе РИУС-5.

Л и т е р а т у р а

1. М.С.Джиджоев, В.Т.Платоненко, Р.В.Хохлов. УФН, 100, 642, (1970).
2. Н.Г.Басов, В.И.Игошин, Е.П.Маркин, А.Н.Ораевский. Сб. "Квантовая электроника" № 2, 3, 1971.
3. D.W. Greig, B. Krawetz, B.R. Shleicher, S.J. Tomas
Chem. Phys. Lett. 8, 609, 1971.
4. Н.Г.Басов, Л.В.Кулаков, Е.П.Маркин, А.И.Никитин, А.Н.Ораевский. ЖЭТФ, Письма, 9, 613, 1969.
5. Г.Г.Долгов-Савельев, В.Ф.Жаров, Ю.С.Неганов, Г.М.Чумаков. ЖЭТФ, 61, 64, 1971.
6. H.K. Shin. Chem. Phys. Lett. 10, 936, 1970.
7. Bethe H. Handb. Phys. XXIV.
8. J. J. DeCorpo, Ronald P. Steiger, J. L. Franklin and J. L. Margrave. J. Chem. Phys.
9. Н.Н.Семенов. Ценные реакции. ГХТИ, 1934.
10. J.R. Airey and S.F. Fried. Chem. Phys. Lett. 8, 23, 1971.
11. J.R. Bott and N. Cohen. 161st. Am. Chem. Soc. National Meeting, Los Angeles. 1971.

Ответственный за выпуск ЧУМАК Г.М.

Подписано к печати 7.6.72. МН10344

Усл. 0,6 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.

Заказ № 45. ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР, гв.