

07;12

## Ослабление излучения импульсного CO<sub>2</sub>-лазера в среде Ar, содержащей мелкодисперсные частицы Al

© И.А. Бакулин, В.С. Казакевич, С.Ю. Пичугин

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,  
443011 Самара, Россия  
e-mail: bakulin@fian.smr.ru

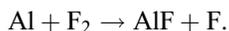
(Поступило в Редакцию 2 марта 2006 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования ослабляющих свойств газодисперсной среды на основе аэрозоля алюминия в атмосфере аргона для излучения с длиной волны 10.6 мкм. Определен оптимальный способ формирования пучка иницирующего излучения. Проведена оценка размеров мелкодисперсных частиц Al и их концентрации в исследуемой среде.

PACS: 42.55.Lt

### Введение

Идея иницирования химического процесса в HF-лазере испарением мелкодисперсной фракции алюминия под действием ИК-лазерного излучения впервые была предложена и проанализирована в работах [1–4]. Суть идеи заключалась в предположении возможности осуществления фотонно-разветвленной цепной реакции (ФРЦР), основанной на нерезонансном взаимодействии лазерного излучения с аэрозольной средой, приводящей к испарению дисперсной фракции и образованию свободных атомов. Возникающие при этом, по замыслу авторов, атомы Al должны были взаимодействовать с F<sub>2</sub> с образованием активных центров — свободных атомов F



При участии молекул H<sub>2</sub> начинается характерная для HF-лазера реакция образования возбужденных молекул фтористого водорода.

Приведенный в [1] анализ условий осуществления ФРЦР в аэрозольной химически активной среде при ее иницировании ИК-излучением с  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  и длительностью импульса  $\tau = 3 \mu\text{s}$  показал, что для перекрытия возникающих диффузионных облаков свободных атомов необходима концентрация частиц аэрозоля порядка  $10^7 \text{cm}^{-3}$  с характерными размерами  $\sim 0.5 \mu\text{m}$ . При этом интенсивность  $I$  лазерного излучения, которая потребуется для испарения частиц алюминия, должна составлять  $\sim 5 \text{MW/cm}^2$ .

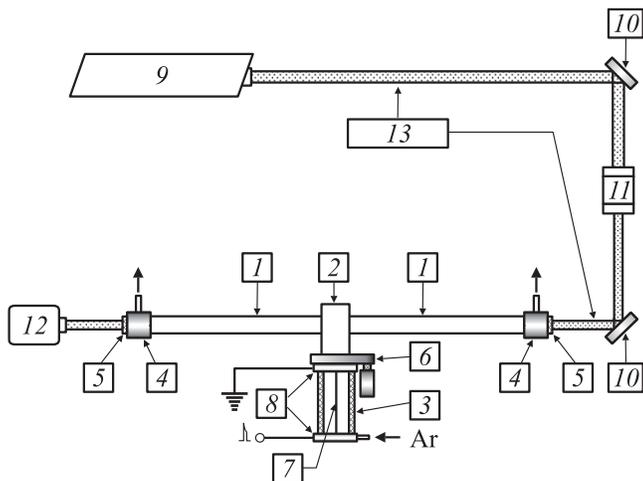
В экспериментальной работе [5] был изучен процесс формирования газодисперсии среды (ГДС) и продемонстрирована принципиальная возможность создания аэрозольных сред на основе субмикронных частиц алюминия, параметры которой были бы максимально приближены к сформулированным выше условиям. Следующим естественным шагом в экспериментальном обосновании разрабатываемой теории является реализация на практике предложенного метода разогрева и испарения частиц алюминия до образования паров с концентрацией

атомов, приводящей к запуску соответствующей химической реакции. Результаты экспериментального исследования в этом направлении и представлены в настоящей работе.

В данной работе рассматривается вопрос эффективности использования импульсного ИК лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  для разогрева и испарения частиц Al. Приводятся данные о величине ослабления излучения на этой длине волны средой, образованной аэрозолем Al в атмосфере Ar, в зависимости от способов формирования лазерного пучка. На основе экспериментально полученных значений коэффициентов ослабления среды для излучения с разными длинами волн проводится оценка размеров частиц мелкодисперсной фракции Al и их концентрации, получаемых в реальном масштабе времени.

### Экспериментальная часть

Экспериментальная установка, схема устройства которой представлена на рис. 1, состояла из рабочей камеры (РК) 1, блока напуска ГДС (2), генератора аэрозоля 3 и двух торцовых блоков 4, через которые осуществлялась откачка РК, а также ввод-вывод пучка лазерного излучения. Рабочая камера представляла собой два отрезка кварцевой трубы длиной по 500 мм, с внутренним диаметром 16 мм, которые были соединены через блок напуска среды. С краев РК герметизировались торцовыми блоками с окнами 5 из BaF<sub>2</sub>, прозрачными для излучения с  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ . В результате общая длина рабочего объема составила 118 см. Блок напуска соединялся с камерой для приготовления ГДС через электромагнитный клапан 6. Основу конструкции генератора аэрозоля (ГА) составил отрезок трубы из стекла с внутренним диаметром 60 и длиной 200 мм. На оси камеры в отдельной гильзе крепилась алюминиевая проволока 7 диаметром 0.2 и длиной 210 мм. Крепежные фланцы ГА 8 одновременно выполняли функцию



**Рис. 1.** Схема устройства экспериментальной установки и оптических измерений.

электрических вводов в разрядной цепи с проволокой в качестве нагрузки.

В качестве источника инициирующего излучения 9 использовался ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер ( $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ) с энергией импульса до 10 J, длительностью  $\sim 0.5 \mu\text{s}$  и апертурой пучка порядка  $3 \times 2 \text{ cm}$ . Пучок излучения 13 направлялся в объем с ГДС с помощью системы зеркал 10, он проходил формирующий элемент 11, в котором преобразовывался к определенному виду. В качестве формирующего элемента поочередно использовались: 1 — собирающая линза с фокусным расстоянием 65 см, 2 — диафрагма с диаметром проходного сечения 8 мм, 3 — коллиматор с коэффициентом увеличения 0.5. Энергия пучка излучения после его прохождения исследуемой среды измерялась фотоприемником ИМО-2Н 12.

Приготовление мелкодисперсной среды проводилось методом взрыва алюминиевой проволоки под воздействием протекающего через нее короткого импульса тока. Взрыв осуществлялся в атмосфере аргона ( $P = 1 \text{ atm}$ ) с энерговкладом, соответствующим энергии сублимации проволоки. После чего открывался клапан, и созданная газодисперсная среда (Al + Ar) напускалась в предварительно откаченную рабочую камеру. Далее через среду пропусклся заданный пучок инициирующего ИК лазерного излучения, прошедшая часть которого фиксировалась фотоприемником. Измерения энергии импульсов излучения, прошедших через среду, проводились с интервалом 1–2 min. Ошибка измерений составляла 14%.

## Результаты и их обсуждение

### Сфокусированный пучок

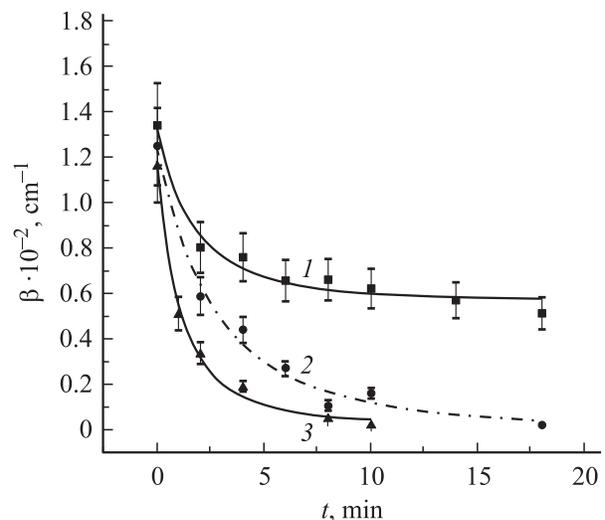
Используемая для преобразования пучка инициирующего излучения положительная линза ( $f = 65 \text{ cm}$ ) располагалась относительно РК таким образом, чтобы

диаметр пучка на входе был лишь не намного меньше размера зрачка РК. В результате фокальная плоскость находилась на расстоянии примерно 20 см от начала рабочего объема, диаметр фокального пятна был равен приблизительно 6–7 мм, а интенсивность излучения —  $\sim 6 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ .

При прохождении сфокусированного пучка через ГДС в рабочем объеме в области фокальной плоскости наблюдалось яркое свечение (по визуальным оценкам протяженность зоны свечения составляла 12–15 см). По своему характеру свечение напоминало свечение плазмы, наблюдаемое при оптическом пробое воздушной среды сфокусированным лазерным излучением. Однако в данном случае светящаяся область имела диффузный характер. С увеличением числа инициирующих импульсов лазерного излучения первоначально сплошная область свечения приобретала фрагментарный характер. По-видимому, с каждым последующим импульсом свечение возникло только в зонах с такой концентрацией частиц Al, величина которой близка к первоначальным значениям.

Исследование динамики поглощающих свойств мелкодисперсной среды, результаты которого представлены на рис. 2, позволили выявить следующие устойчивые закономерности. Для сфокусированного пучка излучения (кривая 1 на рис. 2) можно отметить быстрое падение коэффициента ослабления только в течение первых трех импульсов (4–5 min), после чего его величина выходит на пологий участок кривой относительно стабильных значений, которые соответствуют 50% потери энергии импульса излучения. Такой характер зависимости, как мы полагаем, определяется следующими факторами.

Образующийся в фокусе линзы плазменный канал частично экранирует падающее излучение, задавая тем самым высокий уровень потерь энергии в импульсе.



**Рис. 2.** Динамика изменений коэффициента ослабления газодисперсной среды: (Al + Ar) для излучения с  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ . Пучок излучения: 1 — сфокусированный,  $W = 9.25 \text{ J}$ ; 2 — диафрагмированный,  $W = 10 \text{ J}$ ; 3 — коллимированный,  $W = 8.5 \text{ J}$ .

В начальный момент (при прохождении первого импульса излучения) концентрация частиц с большим радиусом в среде максимальна. Под воздействием лазерного ИК-излучения с поверхности частиц алюминия, разогреваемых до температуры плавления и выше, часть металла испаряется, что приводит к уменьшению их размеров и снижению концентрации крупных частиц. Этот процесс отражает динамика коэффициента ослабления среды в начальной фазе. Однако интенсивно этот процесс протекает только в ограниченном объеме (область плазменного канала), в остальной части рабочей камеры концентрация крупных частиц снижается медленнее, в основном только под влиянием гравитации. Таким образом, ГДС за фокусом является своеобразным поставщиком новых порций крупных частиц, наиболее интенсивно ослабляющих излучение. Как следствие, среда становится более прозрачной от импульса к импульсу, но этот процесс просветления растягивается во времени. Кроме того, обновление фракционного состава аэрозоля возможно за счет перевода во взвешенное состояние осажденных частиц с поверхности стенок камеры вследствие развития локальных газодинамических процессов в зоне плазменного канала. Наличие данных факторов, на наш взгляд вполне объясняет наблюдаемый фрагментарный характер плазменного канала и отсутствие полного просветления среды в наблюдаемом временном интервале.

#### Диафрагмированный пучок

При пропускании через исследуемую среду диафрагмированного пучка ИК лазерного излучения, с поперечным сечением (на диафрагме)  $0.5 \text{ cm}^2$  и интенсивностью  $\sim 0.3 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ , визуальное свечение не наблюдалось. Соответственно изменился по сравнению с первым случаем график временной зависимости коэффициента ослабления среды (рис. 2, кривая 2). В этом случае экспериментальные точки хорошо легли на кривую значений коэффициентов ослабления, падающих со временем по экспоненциальному закону. Практически полное просветление среды наблюдалось по истечении 18–20 min. В условиях, когда интенсивность излучения недостаточна для интенсивного испарения материала частиц, потеря энергии импульсом происходит за счет рассеивания на частицах аэрозоля всего объема камеры до момента их полного осаждения на стенках РК.

Этот способ ввода излучения для интенсивного испарения частиц Al также не может быть признан удовлетворительным, поскольку в результате диафрагмирования значительная доля энергии пучка не используется, и для получения необходимой концентрации атомов алюминия пришлось бы на порядок увеличить энергию импульса лазерного пучка.

#### Коллимированный пучок

Формирование пучка инициирующего излучения посредством телескопической оптической системы с коэффициентом увеличения 1/2 позволило максимально эффективно использовать энергию импульса, повысить

плотность энергии в сечении пучка и более равномерно просвечивать газодисперсную среду. Интенсивность излучения на входе РК составляла  $\sim 1.1 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$  при диаметре пучка на входе в РК примерно 13 mm.

При прохождении излучения через среду отчетливо наблюдалось свечение желтоватого цвета на всей длине рабочей камеры. Спектроскопическое исследование с помощью монохроматора УМ-2 показало, что рассеянному излучению среды соответствует сплошной спектр с границей в коротковолновой области вблизи 498.9 nm. Это позволяет сделать вывод о том, что в момент воздействия на ГДС импульсом инициирующего излучения определенная доля частиц Al по всему объему нагревается до температуры выше температуры плавления алюминия. Интенсивность свечения среды с ростом числа импульсов заметно падала. Анализ динамики коэффициента ослабления (рис. 2, кривая 3) свидетельствует о более быстром просветлении среды, чем в предыдущих случаях. К десятой минуте среда становится практически прозрачной для излучения с  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ . Такое ускорение процесса просветления можно связать только с уменьшением концентрации наиболее крупных частиц Al за счет интенсивного испарения металла с их поверхности. При этом особо следует подчеркнуть, что в процесс испарения вовлечены частицы алюминия практически всего объема.

### Оценка размеров частиц алюминия и их концентрации

Исследование с помощью электронного микроскопа получаемых в генераторе аэрозоля мелкодисперсных частиц алюминия не позволило сделать однозначный вывод относительно их размеров. Полученные снимки указывали на разброс размеров частиц от 1 до  $0.5 \mu\text{m}$ . По-видимому, в процессе осаждения дисперсной среды наблюдается слипание некоторой части частиц с образованием более крупных конгломератов. Поскольку размер частиц и их концентрация являются одними из важнейших факторов успешного запуска химической реакции в исследуемой среде, то для уточнения характеристик среды было дополнительно проведено оптическое диагностирование Al–Ar ГДС.

Физические основы примененного метода в предположении монодисперсности частиц аэрозоля заключаются в следующем. Проба аэрозоля просвечивается излучением сначала одной, а затем другой длиной волны, и измеряются величины ослабления света  $k_1$  и  $k_2$  на этих длинах волн. Поскольку, согласно закону Бугера–Ламберта, интенсивность света, прошедшего через пробу длиной  $l$  аэрозоля с концентрацией частиц  $N$ , определяется как

$$I = I_0 \exp(-Nl\sigma), \quad (1)$$

где  $\sigma$  — сечение ослабления излучения одной частицей аэрозоля, то выражение для величины ослабления

$k = I_0/I$  для излучения с длиной волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно будет иметь вид

$$\begin{aligned} k_1 &= \exp(Nl\sigma_1), \\ k_2 &= \exp(Nl\sigma_2). \end{aligned} \quad (2)$$

При этом  $\sigma$  зависит от диаметра  $d$  частицы. От величины ослабления  $k$  можно перейти к коэффициенту ослабления  $\beta$ , определив его как

$$\beta = \ln k/l. \quad (3)$$

Далее, воспользовавшись теорией Ми [6] для нахождения величины  $\sigma$ , можно найти такие значения концентраций  $N$  частиц диаметра  $d$ , которые для излучения с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  на длине волны  $l$  будут обеспечивать экспериментально определенные  $k_1$  и  $k_2$ .

Необходимо отметить, что реальный аэрозоль не является идеально монодисперсным, поэтому результатом применения данной методики будет нахождение лишь некоторого усредненного или эффективного диаметра частиц алюминия.

На основании экспериментальных данных для коэффициента ослабления лазерного излучения в РК на длине волны  $0.63 \mu\text{m}$  (мощность излучения  $P = 1.8 \mu\text{W}$ , рис. 3) и излучения CO<sub>2</sub>-лазера (мощность излучения  $P \sim 0.15 \text{ MW}$ , рис. 2, кривая 2) были оценены размеры и концентрация частиц Al через 2 min после запуска ГДС.

Измерения показали, что в этот момент времени коэффициент ослабления лазерного излучения составил  $1.3 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$  на длине волны  $0.63 \mu\text{m}$  и  $6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  на длине волны  $10.6 \mu\text{m}$ . Далее по теории Ми были проведены расчеты сечения ослабления излучения на длине волны  $0.63 \mu\text{m}$  частицами алюминия сферической формы диаметром  $d$ , находящимися при комнатной температуре, и частицами, находящимися при температуре, превышающей температуру плавления алюминия, на длине волны  $10.6 \mu\text{m}$ .

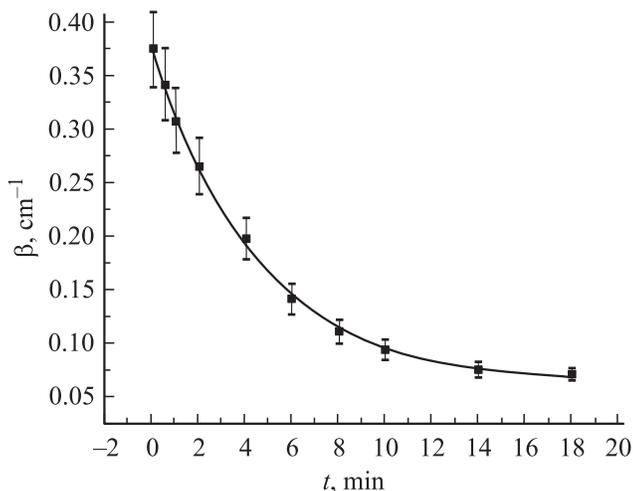


Рис. 3. Динамика изменений коэффициента ослабления газодисперсной среды: (Al + Ar) для излучения с  $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ .

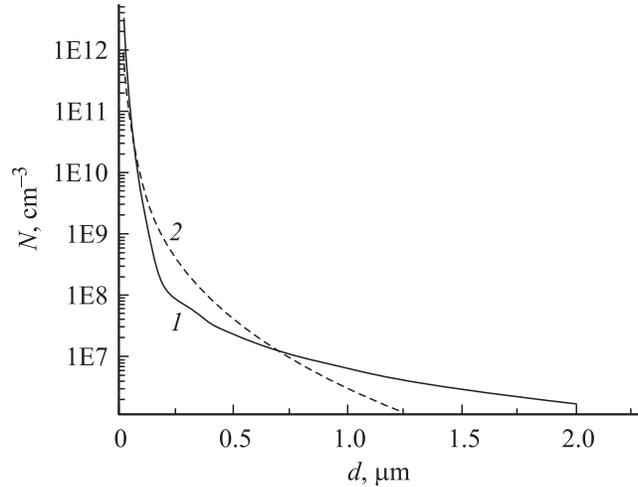


Рис. 4. Расчетные соотношения концентрации и диаметров частиц алюминия, при которых коэффициент ослабления составляет  $1.3 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$  на длине волны  $0.63 \mu\text{m}$  (1) и  $6 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  на длине волны  $10.6 \mu\text{m}$  (2).

Графики расчетных значений концентраций  $N$  частиц диаметра  $d$ , которые для излучения с длинами волн  $\lambda = 0.63$  и  $10.6 \mu\text{m}$  на длине  $l$  обеспечивают экспериментально определенные  $k_1$  и  $k_2$ , представлены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что одной из точек пересечения кривых соответствуют следующие параметры исследуемой газодисперсной Al + Ar-среды: эффективный диаметр частиц составляет  $0.7 \mu\text{m}$ , а соответствующая частицам концентрация  $N \approx 2 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$ . Вторая точка соответствует эффективному диаметру частиц  $\sim 0.2 \mu\text{m}$  с концентраций  $N \sim 8 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ . Как показывают теоретические расчеты, эти параметры ГДС вполне достаточны для реализации идеи ФРЦР.

## Выводы

1. Проведенные исследования показали, что применение излучения с длиной волны  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  для разогрева мелкодисперсных частиц Al ( $d \sim 0.7 \mu\text{m}$ ) в атмосфере аргона до температуры плавления может быть эффективным уже при интенсивности порядка  $1 \text{ MW/cm}^2$ .

2. Эффективным способом ввода энергии излучения в длинный и узкий канал рабочей камеры, содержащий ГДС, является использование коллимированного пучка. В условиях эксперимента таким способом удалось обеспечить нагрев газодисперсной среды на длине не менее 1 м.

3. Проведенная оценка размера частиц Al ( $d \sim 0.7$ ,  $d \sim 0.2 \mu\text{m}$ ) и их концентраций ( $N \geq 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ,  $N \geq 8 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ) указывает на то, что полученные в эксперименте параметры мелкодисперсной среды в целом удовлетворяют требованиям, необходимым для реализации идеи фотонно-разветвленной цепной реакции.

## Список литературы

- [1] *Игошин В.И., Пичугин С.Ю.* // Квант. электр. 1983. Т. 10. № 2, С. 458–461.
- [2] *Игошин В.И., Пичугин С.Ю.* // Квант. электр. 1983. Т. 10. № 9. С. 1922–1924.
- [3] *Игошин В.И., Пичугин С.Ю.* // Химия высоких энергий. 1988. Т. 22. № 6. С. 551–555.
- [4] *Игошин В.И., Пичугин С.Ю.* // Квант. электр. 1989. Т. 16. № 3. С. 437–441.
- [5] *Игошин В.И., Казакевич В.С., Куров А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 15. С. 90–94.
- [6] *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973.