

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ОТ ЭНЕРГИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСА В ВОДНОМ АЭРОЗОЛЕ И В ВОДНОМ АЭРОЗОЛЕ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА

В.А. Донченко², С.С. Голик³, Ал.А. Землянов^{1,2}, А.Ю. Майор⁴,
Р.В. Рямбов², А.В. Трифонова²

¹ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

³ Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

⁴ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

Приведены экспериментально полученные зависимости акустических сигналов от энергии фемтосекундных импульсов в режиме филаментации, распространяющихся в жидкокапельном аэрозоле с наночастицами различной концентрации, моделирующими аэрозоль с частицами Айткена. Показано, что под действием филамента фемтосекундного импульса струя водного аэрозоля разбивается на две струи.

Ключевые слова: фемтосекундный импульс, филамент, порог образования акустической волны, жидкокапельный аэрозоль.

Перенос световой энергии на большие расстояния и лазерное зондирование окружающей среды входят в число основных проблем современной атмосферной оптики. Эффективной передаче лазерной энергии препятствует наличие облаков и туманов, в которых лазерное излучение существенно ослабевает. Для решения этой проблемы в ведущих научных центрах мира активно применяются технологии лазерной филаментации фемтосекундных импульсов. В [1, 2] экспериментально показано, что связанная с филаментом ударная волна выталкивает из области распространения лазерного импульса частицы аэрозоля, очищая от аэрозоля канал распространения световой энергии. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования зависимости величины акустического сигнала от водного аэрозоля с наночастицами серебра (колларгол) от энергии фемтосекундных импульсов в режиме филаментации.

Для проведения эксперимента была собрана экспериментальная установка, схема, которой представлена на рис. 1.

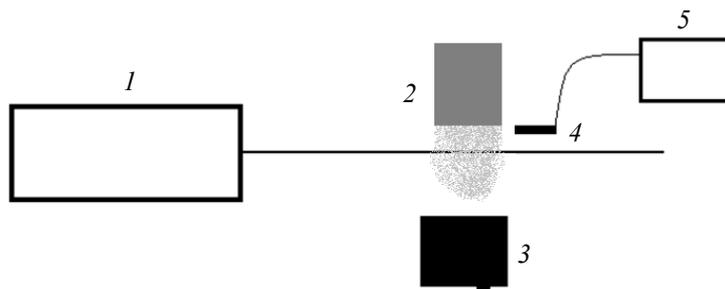


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – Ti:Sa-лазер; 2 – генератор аэрозоля; 3 – фотоаппарат; 4 – микрофон; 5 – осциллограф

Излучение Ti:Sa-лазера с длиной волны $\lambda \approx 0.8$ мкм и длительностью $\Delta t \approx 50$ фс направлялось с помощью сферического зеркала ($f = 5$ м) на струю водного аэрозоля, создаваемого генератором аэрозоля. Энергия лазера повышалась с 3.5 до 8.5 мДж. Изменения среды в зоне взаимодействия филамента с аэрозолем регистрировались фотоаппаратом модели Nikon AF-S NIKKOR 18–55 мм. С помощью микрофона Messkette MTG MK301 (чувствительность 5 мВ/Па, частотный диапазон от 20 до 60 кГц) и осциллографа Agilent Technologies DSO6052A (полоса пропускания 500 МГц, чувствительность 10 мВ/дел.) регистрировался акустический сигнал, сопровождающий взаимодействие филамента и аэрозольной струи.

В качестве жидко-капельного аэрозоля использовался аэрозоль из дистиллированной воды и аэрозоль из водного раствора с наночастицами серебра (колларгол). В качестве генератора аэрозоля применялся ультразвуковой ингалятор «Муссон-1М», распыляющий аэрозоль со скоростью 0.4 мл/мин или $6 \cdot 10^{-18}$ мл/с. Микрофотографии наночастиц серебра, представленные на рис. 2, были получены с помощью электронного микроскопа JESP-II с предельным пространственным разрешением 2 Å.

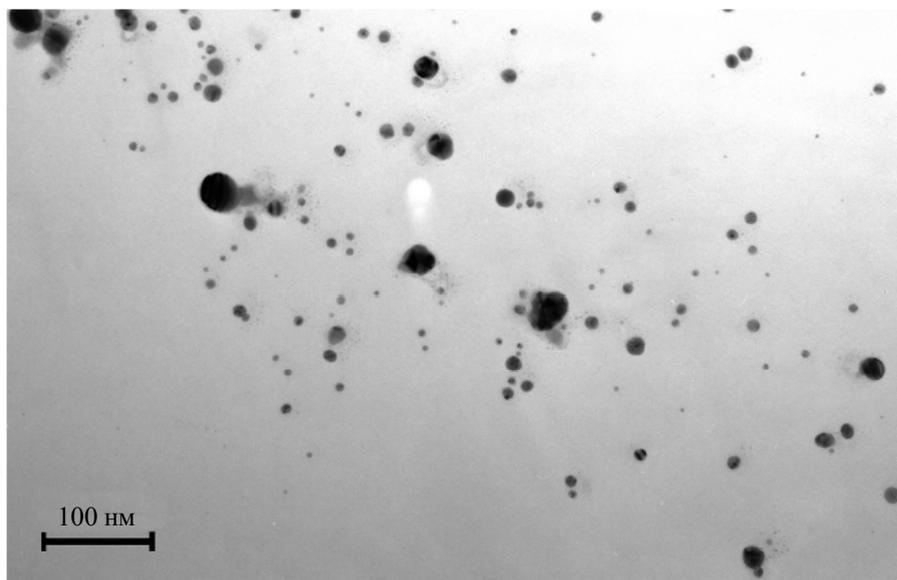


Рис. 2. Микрофотографии одиночных наночастиц серебра (колларгол)

Наночастицы серебра были использованы для моделирования аэрозоля с ядрами Айткена, находящимися в реальной атмосфере и имеющими размеры меньше 200 нм. Данный раствор представляет собой взвесь наночастиц серебра в воде, полученную химическим способом [3].

На рис. 3 представлена фотография филамента, проходящего через струю жидко-капельного аэрозоля. Из рисунка видно, что под действием филамента (обозначенного стрелкой) происходит разбиение струи жидко-капельного аэрозоля. Вероятной причиной разбиения струи является образование акустической волны при филаментации [1, 2].

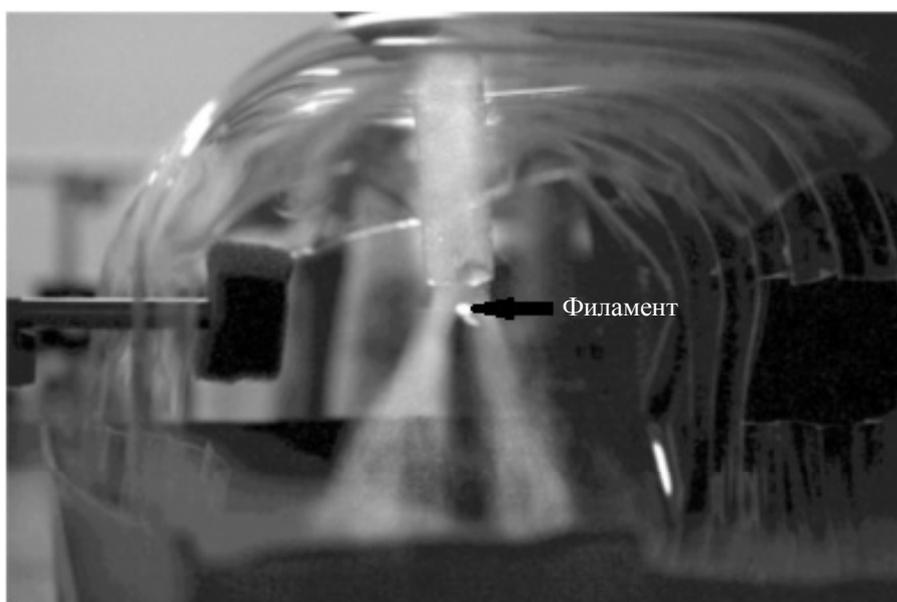


Рис. 3. Разбиение струи водного аэрозоля фемтосекундным импульсом в режиме филаментации

В [4] показано, что филамент может отдавать значительную часть энергии импульса, например при фокусировке, в среду распространения. Энергия импульса затрачивается на создание плазмы. Переданная энергия преобразуется в тепловую энергию после рекомбинации плазмы и вращательной термализации, происходящих за время 1 нс и ~ 100 пс соответственно. Результирующий нагрев составляет от 100 до 1000 К в зависимости от энергии лазерного импульса. Нагретая область плазмы релаксирует сначала за счет газодинамического расширения с испусканием наружу цилиндрической волны давления и плотности, а затем путем теплопроводности [4].

Зависимость величины акустического сигнала от энергии фемтосекундного импульса накачки показана на рис. 4.

Момент образования акустической волны, разбивающей струю надвое, определялся по резкому возрастанию амплитуды акустического давления в зависимости от энергии фемтосекундного импульса и одновременной регистрацией появления разбиения струи с помощью фотоаппарата (рис. 3). Из рис. 4 видно, что зависимости величины акустических сигналов от энергии лазерного импульса для чистой воды и воды с наночастицами серебра с концентрациями 0.01 и 0.5% приблизительно совпадают, в то время как темпы роста величины акустического сигнала от энергии накачки для воды с наночастицами серебра с концентрацией 10% значительно выше. Следует отметить, что для водного аэрозоля без наночастиц и аэрозоля с наночастицами серебра с концентрациями 0.01 и 0.5% разбиение струи происходит при энергиях импульса выше 9 мДж, а для водного аэрозоля с 10%-й концентрацией наночастиц серебра – при энергиях импульса выше 5.5 мДж.

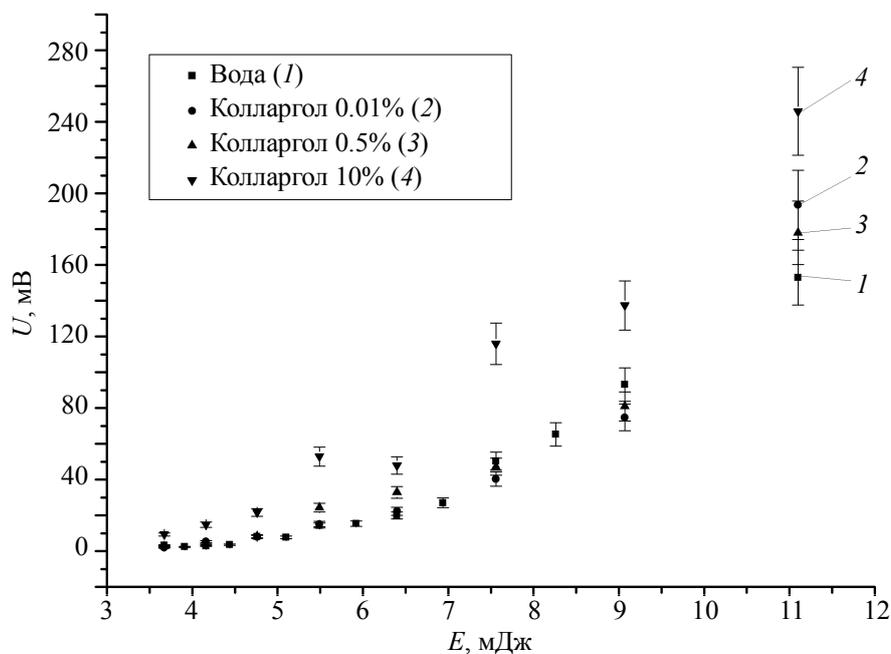


Рис. 4. Зависимость величины акустического сигнала от энергии фемтосекундного импульса в водном аэрозоле и в водном аэрозоле с наночастицами серебра различной концентрации

Таким образом, были получены зависимости величин акустических сигналов от энергии лазерной накачки для водного аэрозоля и водного аэрозоля с наночастицами серебра. Показано, что при взаимодействии филамента фемтосекундного импульса со всеми типами аэрозолей наблюдается образование акустической волны, которая приводит к разбиению струи аэрозоля на две части, при этом образуется свободный от аэрозоля канал распространения фемтосекундного импульса. Этот оптогазодинамический эффект можно связать с действием цилиндрической ударной волны, возникающей после термализации плазмы, приводящей к нагреву филаментационного канала.

Полученные данные необходимы при интерпретации результатов исследований, открывают широкие возможности для распространения лазерного излучения в реальной атмосфере, поскольку жидко-капельный аэрозоль с наночастицами различной концентрации представляет собой модель такой атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schimmel G., Produit T., Monginet D., et al. // *Optica*. – 2018. – V. 5. – No. 10. – P. 1338–1341.
2. De la Cruz L., Schubert E., Monginet D., et al. // *Appl. Phys. Lett.* – 2016. – V. 109. – P. 251105-1–251105-4.
3. Халецкий А. М. Фармацевтическая химия. – Л.: Медицина, 1966. – 763 с.
4. Point G., Thouin E., Mysyrowicz A., et al. // *Opt. Express*. – 2016. – V. 24. – Iss. 6. – P. 6271–6282.

Поступила в редакцию 30.05.2022,
принята в печать 02.11.2022.

Донченко Валерий Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор НИ ТГУ, e-mail: don@spti.tsu.ru;

Голик Сергей Сергеевич, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр. ДВФУ, e-mail golik_@mail.ru;

Землянов Алексей Анатольевич, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. ИОА СО РАН, доцент НИ ТГУ, e-mail: zeml1616@mail.ru;

Майор Александр Юрьевич, д.т.н., ведущ. науч. сотр. ИАПУ ДВО РАН, e-mail: mayor@iacp.dvo.ru;

Рябков Роман Владимирович, аспирант НИ ТГУ, e-mail: ryambovroman@mail.ru;

Трифопова Алина Виталиевна, аспирантка НИ ТГУ, e-mail: boosind@yandex.ru.