

Фазовый взрыв водной капли фемтосекундным лазерным импульсом: I. Динамика оптического пробоя

Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 25.02.2009 г.

Представлена физическая модель фазового взрыва оптически прозрачной водной капли в поле интенсивного лазерного излучения фемтосекундной длительности. Теоретически исследована теплофизическая стадия взрыва, связанная с оптическим пробоем жидкости во внутренних областях микронной частицы. Приведены результаты численных расчетов динамики плазмообразования в капле при различной интенсивности облучения, а также выполнены оценки положения и эффективного размера областей пробоя внутри частицы.

Ключевые слова: фазовый взрыв, оптический пробой, микрочастица, фемтосекундное излучение.

Введение

Значительный прогресс, наблюдающийся в последние два десятилетия в развитии фемтосекундных лазерных систем, применение их для широко-масштабных атмосферных исследований вывели на первый план задачу изучения закономерностей нелинейного распространения мощного ультракороткого лазерного излучения (УКИ) при наличии на трассе аэрозольных образований. Присутствие в воздухе аэрозольных частиц, в частности капель воды, существенно изменяет условия распространения лазерного излучения. Взаимодействие интенсивного УКИ с аэрозолем может сопровождаться явлением оптического пробоя и взрывного разрушения частиц [1, 2]. Внутри прозрачной капли в течение всего импульса в местах наибольшей концентрации световой энергии формируются плазменные очаги, которые являются областями активного поглощения лазерного излучения. Частица, таким образом, кроме линейного оптического ослабления проявляет еще и наведенное излучением нелинейное поглощение, что может повлиять на динамические характеристики самого УКИ.

В результате взрыва и фрагментации аэрозольных частиц происходит существенная перестройка физико-химических свойств канала распространения и при частотно-импульсном режиме работы источников УКИ после прохождения первого импульса в цуге условия распространения для последующих импульсов могут быть уже иными. В отличие от известных традиционных экспериментов по взрыву сильно поглощающих микрочастиц длинными лазерными импульсами (например, воздействие излучения CO₂-лазера на капли воды),

когда излучение напрямую нагревает частицу, приводя к ее взрывному вскипанию (см. монографии [3–5] и ссылки в них), ультракороткое излучение вследствие экстремально высокой плотности мощности ($\sim 10^{14}$ Вт/см²) способно сначала ионизовать внутренние области микрочастицы. Диссипация запасенной в плазменных областях энергии во внутреннюю энергию вещества частицы реализуется, как правило, уже после прохождения лазерного импульса и сопровождается газодинамическим расширением перегретой двухфазной жидкости, приводя к частичному или полному механическому разрушению микрочастицы. Первый и пока единственный известный нам эксперимент по динамике взрыва капель воды в поле излучения фемтосекундного лазера на кристалле сапфира [2] указал на многообразие протекания процесса фрагментации капли при таких условиях и его зависимость от энергии, длительности лазерного импульса и размера частицы.

Необходимо отметить, что задача о фазовом взрыве капли под действием мощного лазерного излучения имеет долгую историю. Возможность светоиндуцированного теплового взрыва капель была теоретически предсказана в [6] при анализе режимов испарения малого объема жидкости под действием излучения. При этом сам взрывной режим испарения связывался с достижением критических параметров вещества в локальных областях капли при быстром неизобарном нагреве жидкости. Экспериментально взрыв капель впервые наблюдался в [7], где исследовалось взаимодействие излучения рубинового лазера ($\lambda_0 = 0,69$ мкм) и 100–200-мкм подкрашенных капель воды, подвешенных на нитях. Взрыв наступал при превышении некоторого порогового значения по плотности поглощенной частицей энергии излучения, которое в [7] было оценено на уровне ~ 20 Дж/см².

* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru).