

Исследование динамики частиц Al_2O_3 , ускоренных в поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера

© А.В. Беликов

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики,
197101 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: meddv@grv.ifmo.ru

(Поступило в Редакцию 27 сентября 2004 г.)

Впервые сообщается о результатах экспериментального исследования влияния плотности лазерной энергии на скорость твердых сапфировых частиц, ускоренных в поле субмиллиметрового импульса YAG:Er лазера. Описана оригинальная система измерения скорости. Показано, что для ускорения частиц сапфира, помещенных в воду (суспензия), требуется энергия практически в два раза меньше, чем для ускорения частиц сапфира, содержащих только воду, абсорбированную поверхностью (порошок). Установлено, что скорость частиц распределена неравномерно в течение времени действия лазерного импульса.

Идея о возможности светового давления восходит к Кеплеру, который в 1619 г. постулировал, что световое давление является той силой, которая определяет положение хвоста кометы всегда в сторону от солнца. Корпускулярная теория света, предложенная Ньютоном, сделала идею светового давления более правдоподобной и стимулировала многочисленные попытки его экспериментального измерения. В XVIII и XIX веках все попытки обнаружить световое давление или силу, которая не могла бы быть приписана конвекции в воздухе, окончились неудачей. В 1873 г. Уильям Крукс полагал, что открыл световое давление в частично эвакуированной камере, хотя в действительности он изобрел радиометр. Существование светового давления, свободного от возмущающих тепловых эффектов, было, наконец, экспериментально доказано в начале нашего века Лебедевым в России и Николсом и Хэллом в США [1]. Световое давление вновь привлекло внимание в свете новых достижений лазерной техники. Еще в 1962 г. в статье [2] было показано, что мощный световой луч способен оказывать сильное действие на заряженные и поляризующиеся частицы, причем сила может менять знак при переходе через резонансную частоту поляризуемости. Были отмечены возможности применения такого воздействия для сдерживания перепада концентрации частиц, транспортировки частиц, создания разрежений или сгущений в средах. В то же время в работе [3] было показано, что с поглощением света в облучаемой частице могут быть связаны три типа сил: нагрев и движение самой среды — конвекционное увлечение, нагрев среды от поглощающей поверхности частицы — радиометрическое давление и давление от испарений самой частицы — светореактивное давление. Все эти эффекты могут во много раз превосходить световое давление и проявляться с большой вероятностью в экспериментах. При этом светореактивное давление может достигать 10^{12} атмосфер. Такое давление можно использовать, в частности, для ускорения макрочастиц [4] до скоростей 10^6 – 10^8 см/с для получения

искусственных микрометеоров, частиц, дающих большие локальные энерговыделения при столкновениях с мишенью или друг с другом. Подобные частицы могут быть использованы для обработки композитных материалов (в том числе биологического происхождения) в тех случаях, когда возможности традиционных или лазерных технологий уже исчерпаны. Так, возможно использование потока Al_2O_3 частиц, ускоренных лазерным излучением для увеличения скорости обработки эмали зуба человека [5]. В этом случае вода, окружающая частицы (суспензия) или абсорбированная поверхностью частиц (порошок), очень эффективно поглощая излучение на длине волны $2.94 \mu\text{m}$, испаряется, стимулируя тем самым светореактивное движение частицы. В настоящей работе мы впервые экспериментально исследовали влияние плотности лазерной энергии на скорость твердых сапфировых частиц, ускоренных в поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера, определили энергии, достаточные для ускорения сапфировых частиц различного диаметра, и оценили распределение скорости частиц по времени, прошедшему с момента лазерного воздействия.

В исследовании использовался макет лазера на кристалле YAG:Er ($\varnothing 6.3 \times 100$ мм), работающий в режиме свободной генерации на длине волны $2.94 \mu\text{m}$. Длительность лазерного импульса по полувысоте составляла величину порядка $250 \mu\text{s}$. Излучение, проходя через CaF_2 линзу, фокусировалось в пятно диаметром $600 \pm 50 \mu\text{m}$, что позволяло достигать плотности энергии 250 J/cm^2 . В качестве твердых частиц использовался сверхчистый Al_2O_3 порошок фирмы Swam-Blast. Паспортная плотность материала частиц составляла величину $3.97 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Диаметр частиц соответствовал 12, 27, 40 и $160 \mu\text{m}$. Мы исследовали порошок и водную суспензию частиц. Водная суспензия готовилась в пропорции: в 300 мг частиц добавлялось 0.2 мл воды. В эксперименте частицы в виде порошка или суспензии помещались в стеклянную кювету, дно которой было изготовлено из сапфира. Толщина слоя твердых частиц была $200 \pm 50 \mu\text{m}$. Лазерное излучение фокусировалось

в плоскость контакта между твердыми частицами и дном кюветы. Ускоренные лазерным излучением твердые частицы покидали область взаимодействия и фотографировались высокочувствительной видеокамерой MINTRON с управляемым затвором, сопряженной с ЭВМ и блоком синхронизации. Оптическая ось объектива видеокамеры была перпендикулярна направлению распространения лазерного луча и проходила через область взаимодействия лазерного излучения с частицами. Блок синхронизации вырабатывал стартовый синхроимпульс, инициирующий лазерную генерацию и кадровый синхроимпульс. Мы могли изменять временной сдвиг Δt_L между началом кадрового синхроимпульса (t_0) и началом лазерного импульса (t_L). Время экспозиции, т.е. время, в течение которого затвор камеры остается открытым, могло быть изменено от $100\ \mu\text{s}$ до $2\ \text{ms}$ и в настоящем эксперименте составляло величину $500\ \mu\text{s}$. В эксперименте также можно было изменять временной сдвиг Δt_S между началом кадрового синхроимпульса (t_0) и моментом открытия затвора видеокамеры (t_S). Таким образом, в течение $500\ \mu\text{s}$ можно было сфотографировать события, происходящие спустя промежуток времени Δt_S . В эксперименте, сокращая Δt_S , мы добивались отсутствия изображения скопления разлетающихся частиц на экране монитора, при этом незначительное увеличение t_S приводило к появлению изображения. Этот момент времени t_1 мы принимали за начало процесса движения частиц. Оценив разность между t_L и t_1 , мы определяли задержку между началом лазерного импульса и началом движения частиц. Далее, увеличивая t_S , мы могли регистрировать скопление разлетающихся частиц в течение времени Δt , определяемого разностью между t_S и t_1 . ЭВМ использовалась для управления блоком синхронизации, сбора, хранения и обработки получаемых в эксперименте фотографий. На полученных фотографиях измерялась длина наиболее интенсивных треков, оставляемых разогретыми в поле лазерного импульса твердыми частицами, летящими в направлении, близком к нормали к поверхности слоя частиц, что позволяло минимизировать неточность в определении длины трека, вызванную разлетом частиц под углами. Зная Δt и длину трека, можно, поделив длину на время, легко определить среднюю скорость движения частиц за этот промежуток времени.

В эксперименте мы определили пороговое значение плотности лазерной энергии, при котором начинается движение частиц различного диаметра. Оказалось, что для ускорения частиц диаметром $12\ \mu\text{m}$ из суспензии достаточно $0.3\ \text{J}/\text{cm}^2$, а для ускорения частиц диаметром $12\ \mu\text{m}$ из порошка необходимо уже $0.7\ \text{J}/\text{cm}^2$. Для ускорения частиц диаметром $27\ \mu\text{m}$ из порошка необходимо $1.5\ \text{J}/\text{cm}^2$, для ускорения частиц диаметром $40\ \mu\text{m}$ — $2.2\ \text{J}/\text{cm}^2$, а для частиц диаметром $160\ \mu\text{m}$ — $6.0\ \text{J}/\text{cm}^2$, т.е. для ускорения частиц сапфира, помещенных в воду (суспензия), требуется энергии практически в два раза меньше, чем для ускорения частиц сапфира, содержащих только воду, абсорбированную

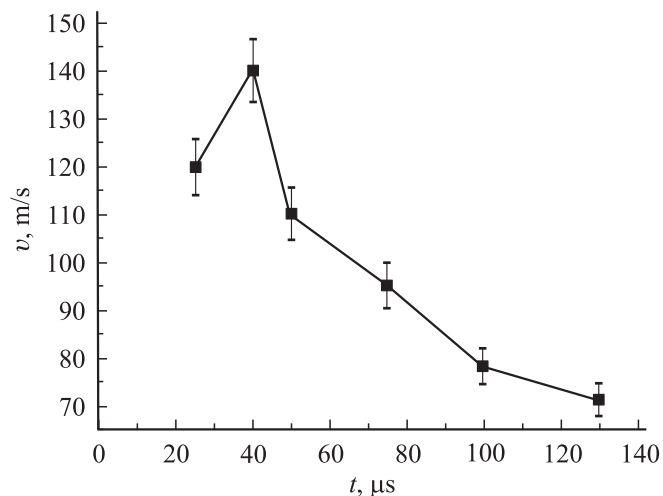


Рис. 1. Зависимость средней скорости движения частиц от времени, прошедшего после начала лазерного импульса (порошок из частиц Al_2O_3 диаметром $12\ \mu\text{m}$, YAG:Er лазер, плотность энергии $135\ \text{J}/\text{cm}^2$).

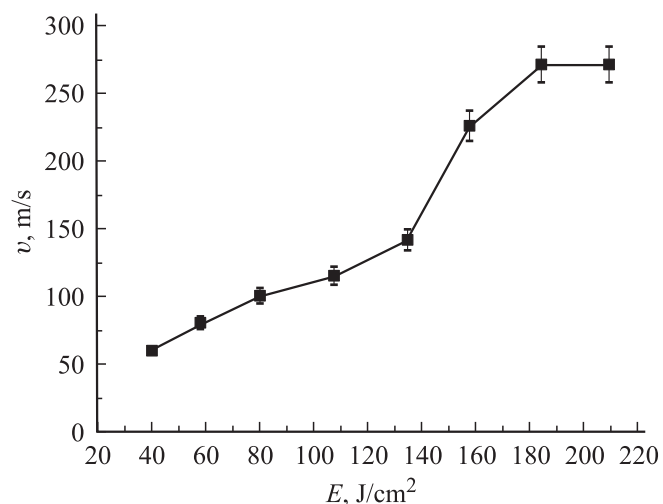


Рис. 2. Зависимость средней скорости движения частиц от плотности энергии лазерного импульса (порошок из частиц Al_2O_3 диаметром $12\ \mu\text{m}$, YAG:Er лазер, скорость регистрировалась спустя $40\ \mu\text{s}$ после начала действия лазерного импульса).

поверхностью (порошок). Мы экспериментально установили, что скорость частиц распределена неравномерно в течение времени действия лазерного импульса (рис. 1) и скорость частиц увеличивается с ростом плотности энергии лазерного излучения (рис. 2). Так, для частиц Al_2O_3 диаметром $12\ \mu\text{m}$ скорость в течение времени действия лазерного импульса сначала резко растет, на сороковой микросекунде достигает максимума и далее постепенно уменьшается к концу лазерного импульса, кроме того, частицы продолжают двигаться после окончания лазерного импульса. Необходимо отметить, что подобная закономерность наблюдалась и для частиц

других диаметров. В поле субмиллисекундного импульса YAG:Er лазера непоглощающая частица из Al_2O_3 , окруженная водой, абсорбированной поверхностью (порошок), может быть ускорена до скорости 275 m/s, что при диаметре частицы $12\ \mu m$ соответствует кинетической энергии порядка $0.27\ \mu J$, достаточной для разрушения такого твердого материала, как эмаль зуба [5].

Список литературы

- [1] *Nichols E.F., Hull G.F.* // Phys. Rev. 1903. N 17. P. 26.
- [2] *Аскарьян А.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 1962. Вып. 42. С. 1567.
- [3] *Аскарьян А.Г., Мороз Е.М.* // Письма в ЖЭТФ. 1962. Вып. 43. С. 2319.
- [4] *Аскарьян А.Г., Рабинович М.С., Савченко М.М.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1967. Вып. 5. С. 258.
- [5] *Altshuler G.B., Belikov A.V., Sinelnik Y.A.* // Lasers in Surgery and Medicine. 2001. Vol. 28. С. 435–444.